

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**APLICACIÓN DE TÉCNICAS
DENDROCRONOLÓGICAS EN *Pinus teocote* Schiede
ex Schltdl PARA LA RECONSTRUCCIÓN CLIMÁTICA
EN EL PARQUE NACIONAL CUMBRES DE
MONTERREY**

POR:

ING. ARMANDO ALBERTO LUNA ROBLES

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Julio de 2020

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DENDROCRONOLÓGICAS
EN *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl PARA LA
RECONSTRUCCIÓN CLIMÁTICA EN EL PARQUE
NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY**

Aprobación de Tesis



Director de Tesis: Dr. Marco Aurelio González Tagle



Asesor: Dr. José Israel Yerena Yamallel



Asesor: Dr. Eduardo Alanís Rodríguez



Co-Directora: Dra. Wibke Himmelsbach

Julio de 2020

AGRADECIMIENTOS

A la beca Conacyt número 2018-000068-02NACF-13700 para poder realizar los estudios de Maestría en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al proyecto PAICYT clave CT33-19 Reconstrucción Paleoclimática para la Sierra Madre Oriental mediante el uso de técnicas dendrocronológicas

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, institución que me ofreció la oportunidad, para realizar mis estudios de Maestría y de la cual siempre he recibido apoyo.

Al Dr. Marco Aurelio González Tagle, estoy plenamente agradecido por su ayuda a lo largo de estos dos años al apoyo, amistad, consejos y enseñanzas brindados hacia mi persona.

A la Dra. Wibke Himmelsbach, por los conocimientos que me brindo a lo largo de estos años que además de eso me brindo su amistad y confianza. Gracias por todos los consejos y aportaciones durante los avances de tesis y también por tener la paciencia para revisar el escrito.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez por su apoyo, amistad aportaciones y sugerencias en la elaboración de mi investigación

Al Dr. José Israel Yerena Yamallel por ser parte de mi comité y haber dedicado tiempo al desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en este camino, por acompañarme y ayudarme a crecer como persona.

A mis padres, Jorge Eleno y Manuela por su apoyo, motivación, paciencia y cariño.

A mis hermanos, Erik, Jorge Alexis y Katia, por todo su cariño y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

A mis amigos, Fatima, Rudy, Esmeralda, Elisama, Deysi, por hacer que todo este proceso fuera más agradable con su compañía.

Índice

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE CUADROS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ANTECEDENTES.....	4
2.1 Origen de la dendrocronología	4
2.2 Formación e importancia de los anillos de crecimiento	6
2.3 Estudios de anillos de crecimiento en México	9
2.4 Importancia del <i>Pinus teocote</i>	11
3 JUSTIFICACIÓN.....	15
4 OBJETIVO.....	16
5 HIPÓTESIS.....	16
6 MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
6.1 Ubicación y descripción del área de estudio.....	17
6.1.1 Suelo y vegetación del área de estudio.....	18
6.1.2 Clima	18
6.2 Metodología de campo	18
6.2.1 Tipos de muestro y obtención de las muestras	18
6.3 Trabajos de laboratorio	21
6.3.1 Preparación de las muestras.....	21
6.3.2 Análisis de las muestras.....	22
6.3.3 Medición de las muestras.....	24
6.3.4 Análisis del fechado por medio del programa COFECHA	25
6.3.5 Generación y evaluación de la cronología	26
6.3.6 Criterios de evaluación de la cronología de <i>Pinus teocote</i>	29

6.3.7 Función de respuesta o relación clima-crecimiento en *Pinus teocote*
33

7	RESULTADOS	35
7.1	Análisis del programa COFECHA y ARSTAN.....	35
7.2	Análisis Crecimiento-Precipitación.....	38
7.3	Análisis Crecimiento - Temperatura.....	42
8	DISCUSIÓN.....	46
8.1	Evaluación de los parámetros dendrocronológicos de <i>Pinus teocote</i> ..	46
8.2	Análisis de la cronología	48
8.3	Relación precipitación-crecimiento	48
8.4	Relación temperatura-crecimiento	49
9	CONCLUSIONES	51
10	BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferenciación del crecimiento de los anillos con diferente grosor	7
Figura 2. Composición del anillo de crecimiento <i>Pinus teocote</i> donde se observa la diferencia de coloración y la densidad de las células (madera temprana y tardía).	8
Figura 3. Presencia de anillos falsos en la madera de <i>Pinus teocote</i>	9
Figura 4. Distribución del <i>Pinus teocote</i> en México	13
Figura 5. <i>Pinus teocote</i> . a) Árbol, b) muestra, c) Tablilla tangencial, Cortes: d) Transversal, e) Tangencial f) Radial (Imagen de De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo, 2016).....	14
Figura 6. Área de estudio para la determinación del potencial dendrocronológico en el ejido Ciénega de González, municipio de Santiago, Nuevo León.....	17
Figura 7. Prototipo de <i>Pinus teocote</i> con las características adecuadas para la extracción de núcleos de crecimiento	19
Figura 8. Extracción de núcleo de crecimiento de <i>Pinus teocote</i> próximo a la base a una altura de 0.40 m. con el taraldro de Presler marca Hägloff	20
Figura 9. Series de anillos sensibles (izquierda) y complacientes (derecha). Las series de anillos complacientes muestran una baja variabilidad, por ejemplo, en el grosor, tal y como muestra la figura (Stokes y Smiley, 1968).	21
Figura 10. Montaje de las muestras <i>Pinus teocote</i> para su análisis dendrocronológico.	22
Figura 11. Conteo preliminar de los anillos, con punto se marcan las décadas, dos puntos los medio siglos y con tres puntos los siglos.	23
Figura 12. Sincronía de las muestras.....	24
Figura 13. Equipo de medición de los anillos de crecimiento mediante el sistema Velmex. Laboratorio de dendrocronología de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL.	25
Figura 14. Patrón del crecimiento representado por el ancho de anillo total de cada serie medida para <i>Pinus teocote</i>	36
Figura 15. Cronologías generadas por el programa ARSTAN a) Estándar, b) Residual y c) ARSTAN.....	37

Figura 16. Correlación entre los meses de precipitación y el índice de anillo total. Las barras en color negro indican correlaciones positivas en el periodo de enero a julio, mientras que las barras de color gris indican correlaciones negativas agosto-diciembre.	39
Figura 17. Correlación de Pearson entre los valores de la precipitación acumulada y los índices de la cronología en su versión estándar. Las barras de color negro indican que los meses acumulados de enero-abril y enero-marzo presentan una correlación positiva, es decir los anchos de anillo son mayores en los periodos mencionados.	40
Figura 18. Asociación de la cronología estándar de anillo total con la precipitación total de enero-abril	41
Figura 19. Asociación de la cronología estándar de anillo total con la precipitación total de enero-mayo	41
Figura 20. Correlación del índice de anillo de la cronología estándar con la temperatura mínima. Las barras de color negro indican que la temperatura mínima en los meses de enero, noviembre y diciembre, el crecimiento de los anillos es significativo.	42
Figura 21. Correlación de Pearson entre los valores de la precipitación mínima de Nov-Ene y la cronología estándar.....	43
Figura 22. Correlación de Pearson de los valores de la temperatura máxima promedio y la cronología en su versión estándar. La barra de color negro indica que cuando la temperatura aumenta en el mes de enero, los crecimientos anuales no son significativos, siendo la temperatura máxima una limitante para el crecimiento.....	44
Figura 23. Correlación de Pearson de los valores de la temperatura máxima de enero y los índices de la cronología estándar.....	45

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Datos de la precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.	34
Cuadro 2. Valor de los parámetros dendroclimáticos obtenidos en el Programa COFECHA para determinar el potencial dendrocronológico de <i>Pinus teocote</i>	35
Cuadro 3. Parámetros estadísticos del programa ARSTAN.....	38

RESUMEN

Los bosques de la Sierra Madre Oriental tienen entre sus componentes especies arbóreas con potencial dendrocronológico. Para determinar el potencial dendrocronológico y la respuesta climática de *Pinus teocote* se analizaron 66 series de crecimiento mediante técnicas dendrocronológicas tradicionales en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM). Además, se determinó la relación descriptiva de la anchura de los anillos con patrones de precipitación y de temperatura. Los valores de los parámetros dendrocronológicos en general fueron similares a los de series de crecimiento desarrolladas con otras coníferas en la misma región: sensibilidad media 0.50, inter-correlación entre series (0.64), relación señal/ruido (36.50) y auto-correlación de primer orden (0.09). El índice de ancho de anillo (IAA) y la precipitación histórica presentaron una correlación significativa ($P < 0.05$) para el lapso invierno-primavera. Por otra parte, el IAA y la precipitación de los meses de enero-abril y enero-junio presentaron una correlación significativa ($P < 0.05$) de $r=0.46$ y $r=0.45$, respectivamente. En comparación, la temperatura mínima y el IAA tuvieron/mostraron una correlación más pequeña ($r=0.24$) pero significativa ($p < 0.05$) en los meses de noviembre-enero. Con respecto a la temperatura máxima, se encontró una correlación significativa ($p < 0.05$) en enero ($r=0.22$). En la cronología residual desarrollada para *P. teocote* se reflejaron sequías severas en los años 1902, 1917, 1929, 1953, 1980, 1996, 1998, 2009 y 2011. En cambio, los periodos húmedos se presentaron en los años 1941, 1959, 1966, 1977, 1992, 2004, 2010 y 2016. El crecimiento de *P. teocote* reaccionó sensiblemente a los cambios de precipitación. Especialmente la falta de humedad se reflejó en un crecimiento reducido. Si los escenarios de cambio climático resultan en una reducción de precipitación y temperaturas más altas en la región, *P. teocote* enfrentará condiciones menos favorables para su desarrollo.

Palabras clave: Dendrocronología, Índice de ancho de anillo, respuesta climática, sequías.

ABSTRACT

The forests of the Sierra Madre Oriental have among their components tree species with dendrochronological potential. To determine the dendrochronological potential and the climatic response of *Pinus teocote*, 66 growth series were analyzed using traditional dendrochronological techniques in the Cumbres de Monterrey National Park (PNCM). In addition, the descriptive relationship of the width of the rings with precipitation and temperature patterns was determined. The values of the dendrochronological parameters in general were similar to those of growth series developed with other conifers in the same region: mean sensitivity 0.50, inter-correlation between series (0.64), signal-to-noise ratio (36.50) and auto-correlation of first order (0.09). The ring width index (IAA) and the historical precipitation presented a significant correlation ($P < 0.05$) for the winter-spring period. On the other hand, the IAA and the precipitation of the months of January-April and January-June presented a significant correlation ($P < 0.05$) of $r = 0.46$ and $r = 0.45$, respectively. In comparison, the minimum temperature and the IAA had / showed a smaller ($r = 0.24$) but significant ($p < 0.05$) correlation in the months of November-January. Regarding the maximum temperature, a significant correlation was found ($p < 0.05$) in January ($r = 0.22$). In the residual chronology developed for *P. teocote*, severe droughts were reflected in the years 1902, 1917, 1929, 1953, 1980, 1996, 1998, 2009 and 2011. In contrast, the wet periods occurred in the years 1941, 1959, 1966, 1977, 1992, 2004, 2010 and 2016. The growth of *P. teocote* reacted significantly to changes in precipitation. Especially the lack of moisture was reflected in reduced growth. If climate change scenarios result in reduced precipitation and higher temperatures in the region, *P. teocote* will face less favorable conditions for its development.

Key words: Dendrochronology, Ring width index, climatic response, droughts.

1 INTRODUCCIÓN

La variabilidad del clima y la incertidumbre sobre sus posibles cambios son un tema de preocupación capital en las ciencias ambientales y sociales, por las previsibles consecuencias que estas alteraciones puedan tener tanto para los grupos humanos como para el medio natural. Ante esta situación, el uso de datos climáticos indirectos, procedentes de fuentes "proxy", constituyen una fuente de información histórica del clima antes de los registros climatológicos instrumentales (Bradley, 1999). De acuerdo al último informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), se muestran variaciones en la frecuencia y cantidad de precipitaciones severas en Europa y Norteamérica (incluido México). Por otra parte, diversos estudios afirman que México es especialmente vulnerable a eventos climáticos extremos, como huracanes, inundaciones y sequías siendo estos últimos los que ya se han registrado, especialmente en el norte del país (Rosas H. y Günther, 2014). Para proteger y asegurar la producción de bienes y servicios ambientales, hace falta predecir la severidad y frecuencia de eventos extremos, y de esta manera a asegurar el bienestar de la población humana. Esto a su vez implica conocer y reconstruir el clima histórico como base de datos para la modelación de escenarios futuros. Sin embargo, no hay registros instrumentales en todas las áreas forestales y tampoco desde tanto tiempo (poner aquí un año de referencia y su fuente). Enfrentando esta situación, la dendrocronología se nos ofrece como una herramienta indirecta para conocer y reconstruir eventos climáticos históricos antes de los registros instrumentales.

La palabra dendrocronología indica una relación muy estrecha entre los árboles y el tiempo; está deriva del griego dendron –árbol-, crono –tiempo- y logo –conocimiento y denomina una disciplina científica dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales, extraer, separar e interpretar la información que contienen de los diferentes factores que han influido en su crecimiento (Gutiérrez, 2009a). Es así que los estudios dendrocronológicos resultan de gran relevancia para realizar

reconstrucciones paleoclimáticas, ya que son de alta resolución y permiten analizar las fluctuaciones interanuales y multianuales del clima pasado (Fritts, 1976).

Especialmente en ecosistemas templados, la dendrocronología se usa ampliamente para estudiar el determinismo ambiental del crecimiento de los árboles. Ya que el ancho de los anillos de crecimiento proporciona información sobre la ecología, hidrología y el paleo-clima. Por lo tanto, diversos factores abióticos, y bióticos están ligados directamente a la formación de los anillos (Fritts, 1976).

Actualmente, el mayor número de estudios dendrocronológicos en México han sido realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), quien ha generado más de 170 series de tiempo dendrocronológicas, principalmente con los géneros *Pinus*, *Pseudotsuga* y *Taxodium* (Cerano-Paredes et al., 2009; Constante García, Villanueva Díaz, Cerano Paredes, & Cornejo Oviedo, Valencia Manzo, 2009; Villanueva Díaz, Cerano Paredes, Stahle, Estrada Ávalos, & Constante García, 2008; Villanueva diaz et al., 2007).

México tiene una importante reserva forestal por lo que se considera un punto de diversidad de género *Pinus* debido a la cantidad de especies (40% del total mundial) y especies endémicas que alberga (más del 55%) (Perry 1991; González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González, & López-Enríquez, 2012). Las especies se distribuyen en diferentes tipos de vegetación en altitudes que van desde el nivel del mar hasta más de 4000 m (Gernandt and Perez-de la Rosa, 2014; Rzedowski 1978), y una de las áreas más diversas es la SMO (González-Elizondo et al., 2012).

La especie de *Pinus teocote* Schltdl. & Cham, se distribuye en casi todo el territorio nacional, desde Chihuahua hasta el suroeste de Chiapas. Es la especie con mayor distribución de las especies estrictamente mexicanas (Eckenwalder, 2009). En Nuevo León, es considerado como una de las especies con mayor altura, su distribución es frecuente desde la porción central hasta el sur del

estado, habita principalmente en la SMO, con preferencia en áreas frescas y, húmedas (Municipio de Santiago) o en la transición de zonas húmedas hacia áreas secas (Zaragoza, Galeana y Arramberri). Frecuentemente se encuentra asociado con bosques de otras coníferas y encinares, entre los 1,200-2,800 msnm (Estrada Castellón et al., 2014).

Los estudios dendrocronológicos son cada vez más comunes en México, particularmente en bosques de coníferas del género *Pinus*, debido a la capacidad de sus especies para producir anillos de crecimiento anual bien definidos que facilitan una herramienta para el análisis de las condiciones climáticas en periodos sin registro (Villanueva Díaz et al., 2015; Villanueva diaz et al., 2007; Cerano-Paredes et al., 2009; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Diaz, & Burns, 2003; Villanueva Díaz, Fulé, Cerano Paredes, Estrada Ávalos, & Sánchez Cohen, 1989; Fritts, 1976). Sin embargo, la especie del género *Pinus* de la cual no se tiene mucha información sobre su potencial dendroclimático es la de *Pinus teocote* (Gutierrez-Garcia, 2004). Nuevo León ocupa en la comparación nacional el segundo lugar en riqueza de especies y endemismos para la flora fanerogámica con unas 3,600 especies endémicas (CONANP, 2007). Al respecto de la avifauna, ocupa el primer lugar de especies endémicas de todo México (CONANP, 2007). La SMO en el estado posee particularmente la segunda mayor concentración de especies de pinos y encinos (CONANP, 2007). Por lo tanto, alteraciones y cambios climáticos podrían tener como consecuencia cambios en composición y abundancia de especies poniendo en peligro la persistencia de algunas especies endémicas tanto de flora como de fauna. Los estudios dendrocronológicos y la identificación de patrones climáticos del pasado en la SMO, nos podría dar información para explicar la situación forestal y ecológica actual en Nuevo León, así como generar información básica para el cálculo de escenarios futuros. En base a lo anterior, el objetivo del estudio es evaluar el potencial dendroclimatológico en la especie *Pinus teocote* y determinar la relación descriptiva de la anchura de los anillos con la precipitación y temperatura en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

2 ANTECEDENTES

2.1 Origen de la dendrocronología

Teofrasto (322 a. C), en su libro Historia de las plantas, fue el primero en mencionar la existencia de los anillos de árboles y el hecho de que se formen anualmente, aunque esto último no fue aceptado por los botánicos del momento.

Para mediados del siglo XV, Leonardo da Vinci observó detalladamente las secciones transversales de los pinos concluyendo que los anillos en los troncos de árboles cortados muestran los años y, según su espesor, reflejaron años más o menos secos (Giraldo Jiménez, 2011). La primera investigación sobre anillos de crecimiento se atribuye a Duhamel y Buffon quienes, en Francia, Alemania y Suecia en el año de 1737 buscaron la explicación sobre la excentricidad y el espesor de los anillos además de la formación de la albura (Studhalter, 1956, Schweingruber, 1988).

Consecuentemente para el año de 1783, el botánico alemán Burgsdorf alegó que la formación de anillos en árboles de una especie y cuyos individuos crecen en la misma localidad presentan el mismo patrón de crecimiento. Por lo tanto, observó que las fuertes heladas del invierno entre 1708 y 1709 se reflejaban en los anillos de crecimiento de los árboles; de ahí, Studhalter (1956) lo catalogó como el padre del crossdating (Giraldo Jiménez, 2011).

El forestal austriaco Arthur Freiherr von Seckendorff-Gudent (1845-1886) estudió la anualidad y la edad a gran escala de *Pinus nigra*, colectados en diversas regiones del imperio austro-húngaro; sus observaciones le permitieron establecer secuencias y patrones mediante una técnica “anillos característicos” conocida como crossdating (Wimmer, 2000).

La dendrocronología tiene sus orígenes a mediados del siglo XIX cuando Theodor Hartig (1982) mencionó que la formación de los anillos de crecimiento es una consecuencia de las bajas temperaturas de invierno. En 1937, cuando el

estadounidense Andrew Douglass considerado como el padre de la dendrocronología realizó el primer análisis de los patrones del ancho de los anillos, quien, interesado en estudiar la actividad solar y su relación con el clima en la tierra, halló la dependencia entre el espesor de los anillos y la precipitación en árboles de *Pinus ponderosa*. Al mismo tiempo, Huber (1942), motivado por los problemas planteados por Douglass, desarrolló la dendrocronología en Europa. Ambos fundaron los principios de la dendrocronología moderna dejando al descubierto un nuevo campo de investigación con aplicaciones en arqueología, climatología y geomorfología (Fritts, 1976). En años posteriores, el estadounidense Edmund Schulmann y los alemanes Hal Fritts, Fritz Schweingruber y Bernd Becker introdujeron métodos estadísticos aplicables al análisis de anillos y su relación con reconstrucciones climáticas y captura de carbono (Sáenz Ceja et al., 2014).

Por otro lado, en México a principios de la década de los 2000 se inició el laboratorio de dendrocronología en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA) ubicado en la Comarca Lagunera en el municipio de Gómez Palacio, Durango, y pertenece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), es el único laboratorio del país que se reconoce tanto por instituciones nacionales e internacionales. Destaca especialmente la colaboración constante y muy estrecha con la Universidad de Arkansas y la Universidad de Arizona en Tucson, así como con algunas otras instituciones latinoamericanas y nacionales.

Sin embargo, la mayoría de los estudios dendrocronológicos se ha desarrollado para especies del norte y centro del país (Villanueva *et al.*, 2003), con la intención de determinar la variación del clima a lo largo de ciertos periodos de tiempo (Villanueva et al., 2007; Constante et al., 2009).

2.2 Formación e importancia de los anillos de crecimiento

El inicio y cese del crecimiento periódico se manifiesta en los árboles mediante características estructurales, que se reflejan en incrementos del tejido de la madera (xilema) del tallo. En plantas leñosas, el cambium vascular se activa durante la temporada de crecimiento, formando xilema hacia el interior y floema hacia el exterior (Kozlowski, 1979; Vignote-Peña & Martinez, 2006). En climas templados, si estos cambios son anuales, se le nombra anillo de crecimiento anual y se asocian al fotoperiodo o al cambio en temperatura y precipitación (Husch, Miller y Brees, 1972). En las coníferas, los anillos de crecimiento de los árboles son el resultado de un crecimiento anual que inicia en primavera y culmina en verano, por lo que, un anillo de crecimiento se presenta cada año. Los anillos de crecimiento contienen información acerca del conjunto de factores ambientales que influyen sobre la dinámica y evolución de los bosques (Fritts, 2001).

El grosor de los anillos de crecimiento está influenciado por una serie de factores endógenos (competencia o supresión) y exógenos (factores climáticos, plagas, incendios, entre otros) y su variación en grosor puede ser representado con un modelo lineal. (Cook, 1987). En regiones templadas y frías, los árboles producen un anillo por año, en el cual se registran las condiciones climáticas que se presentaron antes o durante la estación de crecimiento. En base a esto, se pueden diferenciar patrones en el ancho y densidad de los anillos los cuales reflejan fluctuaciones climáticas durante su formación (Fritts, 1976; Vignote-Peña and Martínez, 2006) (Figura 1).

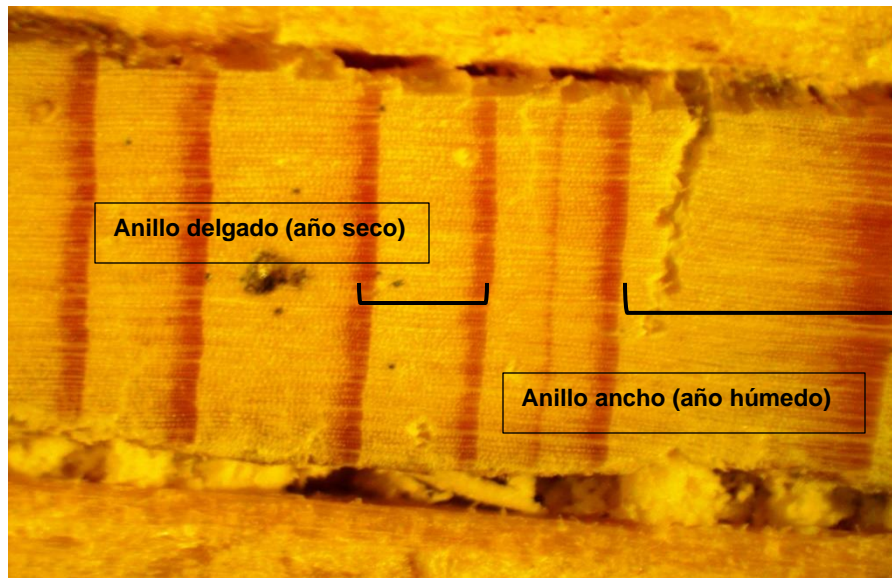


Figura 1. Diferenciación del crecimiento de los anillos con diferente grosor

Madera temprana y tardía

Además de distinguir cada uno de los anillos de crecimiento y su grosor, se puede clasificar la madera dentro de un anillo, en madera temprana y madera tardía (Novak, 2017). En coníferas, casi la totalidad de la madera (95%), está formada por traqueidas, pero las diferencias de tamaño y coloración entre la madera tardía de un anillo y la temprana del siguiente permiten la identificación y la datación de los anillos (Gutiérrez, 2009).

La madera temprana es la parte de la madera que se forma al principio del periodo del crecimiento o período vegetativo, que, a menudo, da lugar a madera menos densa, más clara y con células de mayor diámetro y menor espesor de pared que la madera tardía. Por otra parte, la madera tardía está formada al final de periodo de crecimiento, es más oscura y está formada por células más pequeñas de paredes celulares más gruesas.

A nivel anatómico, las traqueidas de la madera temprana tienen un diámetro radial mayor y una membrana secundaria más fina que las de la madera tardía

(Figura 2.2) (Gemmell, 1969). Mientras que la primera cumple con la función fisiológica del transporte de nutrientes y agua, la segunda contribuye a la resistencia mecánica, evitando el embolismo (Bernal y Terrazas, 2000).

En bosques templados dichos anillos están bien definidos por células de mayor tamaño en la madera temprana y de menor tamaño en la madera tardía. En contraste, en maderas tropicales la delimitación del anillo puede estar dada por estructuras celulares como parénquima marginal y fibras de paredes más gruesas o aplanadas en dirección radial (Carlquist, 1988; Vignote-Peña & Martínez, 2006) (Figura 2).

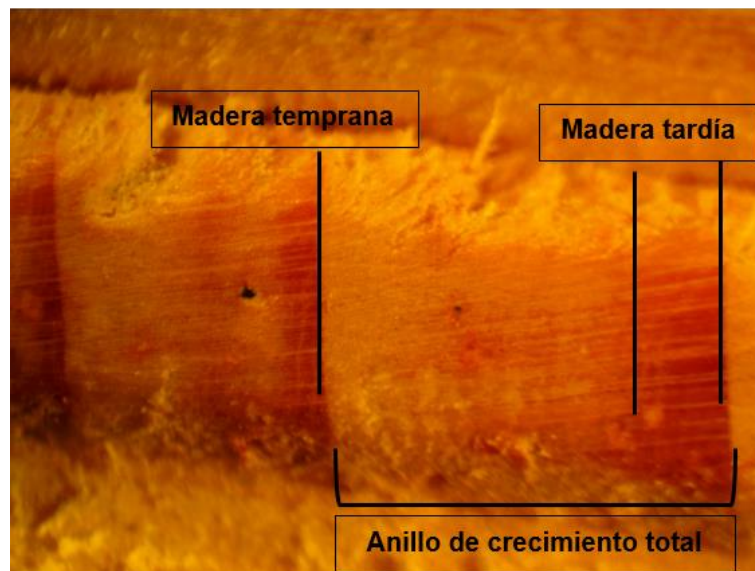


Figura 2. Composición del anillo de crecimiento *Pinus teocote* donde se observa la diferencia de coloración y la densidad de las células (madera temprana y tardía).

Anillo falso

Una problemática que se pueden enfrentar en los estudios dendrocronológicos es la presencia de anillos falsos

Se forman debido a que el crecimiento es interrumpido por situaciones tales como: sequía, heladas, defoliación por ataque de insectos, granizo, pérdida

temporal del follaje causada por heladas tardías, ataques de hongos, de insectos o debido al estímulo de crecimiento fuera de la época motivado por condiciones favorables; en la primera estación seca seguida de otoño lluvioso, disponibilidad súbita de nutrientes, eliminación de competencia, etc. (Burger; Richter, 1991; Priya & Bhat, 1999) (Figura 3).

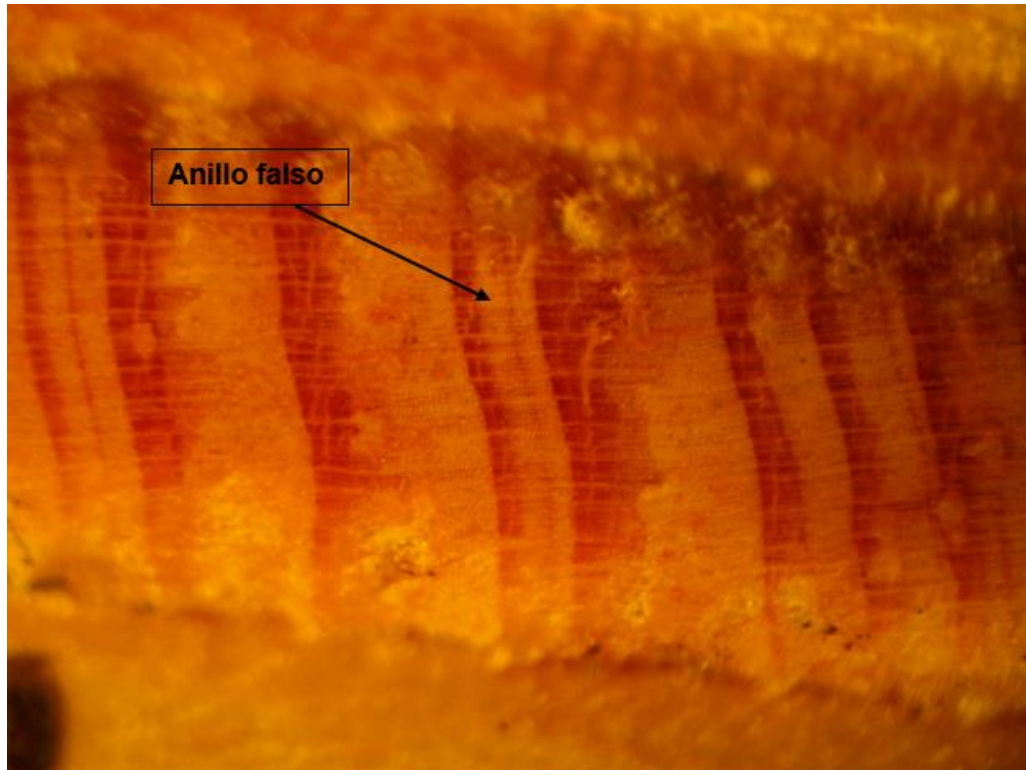


Figura 3. Presencia de anillos falsos en la madera de *Pinus teocote*.

2.3 Estudios de anillos de crecimiento en México

Las primeras contribuciones de estudios dendrocronológicos en México fueron aportadas por Schulman (1944), Schulman (1956) y Scott (1966), los cuales desarrollaron cronologías derivadas de rodales de *Pinus sp*, *Pseudotsuga menziensis* y *Abies Duranguensis* Martínez ubicados cerca de El Salto, Durango. Los esfuerzos de Schulman (1972) para desarrollar cronologías en México se mejoraron sustancialmente a consecuencia de varias expediciones de Investigación que se realizaron en la década de los 70, como parte del “Proyecto mexicano de anillos de árboles” de la Universidad de Arizona (Estados Unidos de

América). En dicho proyecto se generaron 20 cronologías de especies. Por otra parte, las primeras reconstrucciones dendrocronológicas climáticas para México son estimaciones de precipitación y del Índice de Severidad de Sequía de Palmer para el área fronteriza en el norte de Sonora (Villanueva- Díaz, 1996; Villanueva- Díaz y McPherson, 1995; 1996).

Las cronologías de anillos de árboles de México resultan particularmente importantes debido a que la mayoría de ellas están bien correlacionadas con la precipitación invernal y con índices de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés)(Stahle et al., 2004).

La influencia climática del ENSO se refleja en cronologías de anillos de árboles derivadas de coníferas del norte y noroeste de México. Diversos estudios han usado los datos de dendrocronologías mexicanas logrando reconstruir índices de ENSO (Lough y Fritts, 1985; Michaelsen, 1989; Michaelsen y Thompson, 1992; Cleaveland et al., 1992; Lough, 1992; Stahle y Cleaveland, 1993; Stahle et al., 1998; (Cerano-Paredes et al., 2009; Cerano Paredes et al., 2011; Cleaveland et al., 2003; Therrell et al., 2002).

En el estado de Durango, Chávez et al. (2007) generaron cronologías en las especies de *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi* y *Pinus lumholtzii* con el objetivo de reconstruir y analizar la variabilidad hidroclimática histórica. Logrando reconstruir patrones de lluvia invierno-primavera para los últimos tres siglos, identificando importantes periodos de sequía.

Santillán et al. (2017) analizaron el potencial para la reconstrucción climática de *Pinus pinceana* Gordon en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Hidalgo y Querétaro. Encontraron que esta especie refleja en sus anillos sensibilidad al clima específicamente en Zacatecas, Hidalgo y Querétaro.

En la Sierra Las Alazanas en Coahuila se reconstruyeron los patrones de precipitación para un periodo de 219 años (1982-2000) analizando la cronología de *Pseudotsuga menziesii* (Pohl et al., 2003).

Biondi (2001) realizó un estudio dendrocronológico con la especie *Pinus hartwegii* en el Nevado de Colima reportando una cronología que comprendió un periodo de 400 años. Los análisis estadísticos de dicho estudio comprobaron que la precipitación de verano debido al monzón influyó mayormente el crecimiento de esta especie.

Therrel *et al.* (2002) con el uso de cronologías de coníferas de las regiones centro y norte de México, comprobaron el inicio del período de lluvias en estas regiones y su relación con el monzón mexicano en estas regiones.

El análisis de cronologías desarrolladas tanto para el norte de México como para el suroeste de Estados Unidos ha permitido observar periodos de sequías prolongadas que coinciden entre ellas pero que al parecer se inician primero en México desplazándose posteriormente al suroeste de Estados Unidos (Stahle *et al.*, 2000)

Hasta la fecha, la mayoría de los estudios dendroclimáticos en el país han sido realizados por Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Actualmente se conocen más de 170 series de tiempo dendrocronológicas, basados principalmente en los géneros *Pinus*, *Pseudotsuga* y *Taxodium* (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Cleaveland *et al.*, 2003; Santillán-Hernández *et al.*, 2010; Villanueva-Díaz *et al.*, 2018; Villanueva Díaz *et al.*, 2007; Villanueva Díaz *et al.*, 2015, 2014, 2008, 1989). Muchas de ellas se han utilizado para reconstruir patrones de precipitación y analizar el impacto de fenómenos de circulación general (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Villanueva Díaz *et al.*, 2007; Villanueva Díaz, Cerano Paredes, Stahle, Estrada Ávalos, & Constante García, 2008; Cerano Paredes *et al.*, 2011; Díaz-Ramírez, Villanueva-; Villanueva Díaz *et al.*, 2015; Díaz, & Cerano-Paredes, 2016;)

2.4 Importancia del *Pinus teocote*

En México, las coníferas están presentes en diversos tipos de vegetación. De acuerdo con Rzedowski (1978) se encuentran en el bosque de pino, matorral de pino, bosque de *Abies*, bosque de *Pseudotsuga* y *Picea*, bosque o matorral de

Juniperus y bosque de *Cupressus*, entre otros. De las 6 familias de coníferas reconocidas a nivel mundial, cuatro están presentes en México (*Cupressaceae*, *Pinaceae*, *Podocarpaceae* y *Taxaceae*) (Gernandt and Perez-de la Rosa, 2014), mientras que 10 de los 71 géneros y 94 especies tienen una distribución natural en el país.

Las coníferas tienen una amplia distribución altitudinal y latitudinal en México. El género *Pinus* se encuentra desde cerca de la costa de Baja California (*Pinus muricata*) hasta los límites arbóreos de los volcanes más altos del Eje Volcánico Transversal en el sur-centro del país (*Pinus hartwegii* en el Pico de Orizaba, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca y el Nevado de Colima) (Gernandt and Perez-de la Rosa, 2014). En el noreste de México, especialmente en la SMO el estado de Nuevo León contiene 24 especies de coníferas lo que representa el 25% del total de especies presentes en el país.

Pinus teocote es una especie endémica de México y común en las regiones intertropicales y subtropicales del país. Tiene una amplia distribución en México encontrándola en la mayoría de los estados del país: Aguascalientes, Chiapas, Chihuahua, Ciudad de México, Coahuila, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas (Servicio Forestal de los Estados Unidos) (Figura 4). Su distribución altitudinal varía entre los 1000 a los 3000 msnm (Perry, 1991). Los rodales más extensos se encuentran entre 1 500 y 2 500 msnm (Alba *et al.*, 2011). Prospera en sitios con una precipitación de 600 a 1 500 mm anuales y temperaturas entre 14 y 38 °c (Martínez, 1948; Mirov, 1967; Loock, 1950)

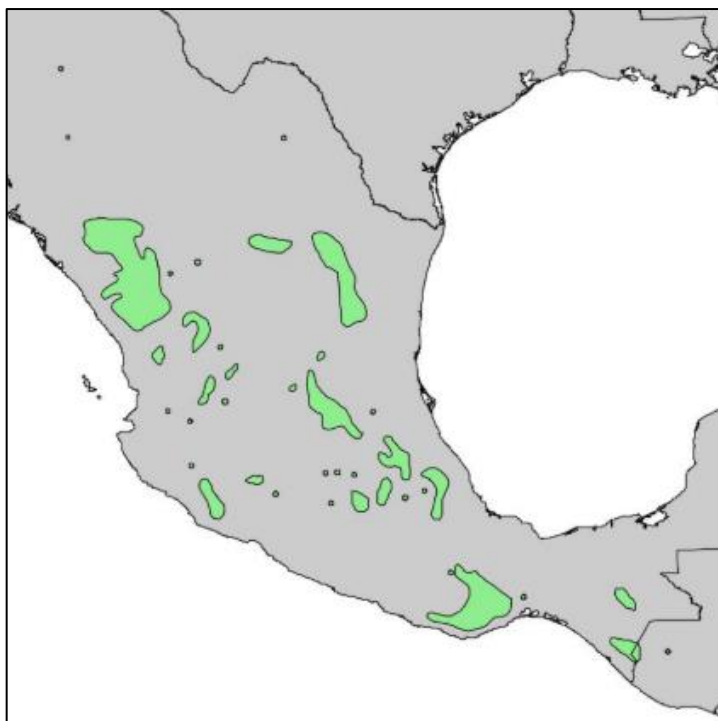


Figura 4. Distribución del *Pinus teocote* en México

Los bosques de *P. teocote* muchas veces están formados por rodales puros y en algunas ocasiones por rodales mixtos con especies de *Pinus* y *Abies religiosa*. (Rzedowski, 1978; Perry, 1991).

La albura y el duramen de la madera de *P. teocote* no presenta diferencia de color. En la madera temprana un color castaño muy pálido mientras que en la madera tardía el color es amarillo rojizo. El olor y el sabor de esta madera es poco resinoso, presentando un brillo bajo en las secciones transversales y alto en las tangenciales y en las radiales. Debido a la diferencia de la madera temprana y tardía el veteado es pronunciado, la textura es fina y el hilo es recto. Los anillos de crecimiento suelen presentarse de 3 a 7 en 1.0 cm y con canales resiníferos poco visibles (De la Paz-Pérez y Dávalor Sotelo, 2016).

En cada anillo de crecimiento, la proporción de madera temprana y tardía es de cuatro a uno siendo la madera temprana la que tiene mayor presencia, la transición de una a otra es gradual. Los canales axiales son más abundantes en la madera temprana que en la tardía, presentándose de 8 a 12 en 1.5 cm. Las

traqueidas son largas, con diámetro mediano y pared delgada en la madera temprana y de diámetro fino y pared mediana en la tardía, ambas con una hilera de puntuaciones areoladas, presentando crásulas (De la Paz-Pérez y Dávalor Sotelo, 2016) (Figura 5).

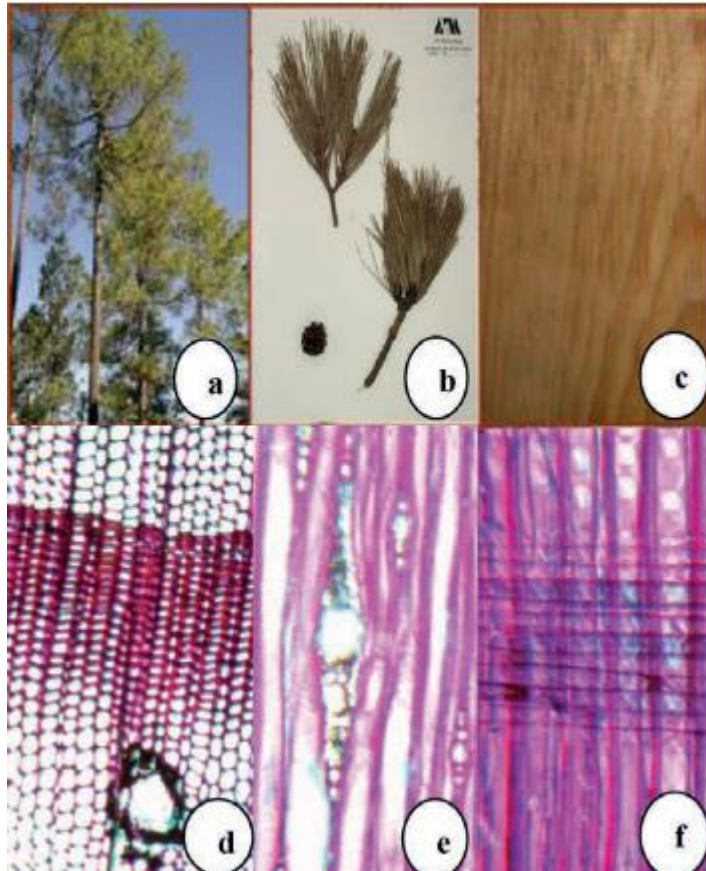


Figura 5. *Pinus teocote*. a) Árbol, b) muestra, c) Tablilla tangencial, Cortes: d) Transversal, e) Tangencial f) Radial (Imagen de De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo, 2016).

La madera de este pino se utiliza principalmente para construcciones, producción de papel y celulosa, pilotes, aserrío y producción de resina, así como combustible (Martínez, 1948; Gómez, 1988).

3 JUSTIFICACIÓN

La variación de fenómenos climáticos, como temperatura, patrones de precipitación, nivel del mar, es lo que constituye el llamado cambio climático (Prentice 2001). Las proyecciones de cambio climático del IPCC (2007) indican que entre 20 % y 46 % de las superficies de los bosques de coníferas experimentarán modificaciones de 2020 a 2050. Para la creación de modelos y el cálculo de las tendencias futuras en el desarrollo del clima se ocupan datos del pasado y extensos, es por eso que el estudiar especies que generan anillos de crecimiento es importante debido a que las estaciones climáticas cubren periodos cortos y suelen ser incongruentes (Constante et al. 2010).

Además, conocer el historial climático es fundamental para la planeación de recursos hídricos, para la planeación y el manejo de bosques en una región, de tal manera que estas zonas puedan seguir aportando productos y servicios ambientales, por otra parte, se pueden prevenir las catástrofes naturales por inundaciones o sequías extremas (Villanueva et al., 2015)

La especie de *Pinus teocote* es una de las coníferas con mayor distribución en México, a la cual su potencial dendrocronológico había sido desconocido hasta mayo 2019 cuando Gutiérrez-García y Ricker (2019) publicaron sus resultados en una investigación dendrocronológico en la Sierra de Antonio Peña Nevada en Nuevo León (Gutiérrez-García y Ricker, 2019). La madera de esta especie forma anillos de crecimiento bien distinguibles, lo cual facilita y es apto para el análisis dendrocronológico.

En base a lo anterior, el presente estudio aporta información sobre la respuesta climática que tiene la especie a las variables de precipitación y temperatura. Además, contribuye a la ampliación de una red dendrocronológica de la especie en el país, en donde las proyecciones de los escenarios de cambio climático para las regiones áridas subtropicales (como el norte de México) predicen cambios en el patrón e intensidad de ciclo hidrológico, contemplándose una disminución de la precipitación promedio (IPPC, 2013).

4 OBJETIVO

Objetivo general

Evaluar el potencial dendroclimatológico de la especie *Pinus teocote* en la Sierra Madre Oriental y determinar la relación descriptiva de la anchura de los anillos con patrones de precipitación y de temperatura en el PNCM.

Objetivos específicos

1. Análisis de los anillos de crecimiento de *P. teocote*
2. Generar una serie dendrocronológica para *P. teocote* a través del análisis de los anillos de crecimiento anuales.
3. Correlacionar la precipitación mensual y acumulada con el índice de ancho de anillo total
4. Evaluar el grado de correlación entre el crecimiento de los anillos de crecimiento y la temperatura ambiental para *P. teocote*.

5 HIPÓTESIS

La especie *Pinus teocote* tiene potencial dendrocronológico para determinar los patrones de precipitación y temperatura histórica en el área de estudio.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación y descripción del área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) en el estado de Nuevo León, específicamente en el municipio de Santiago (Figura 6).

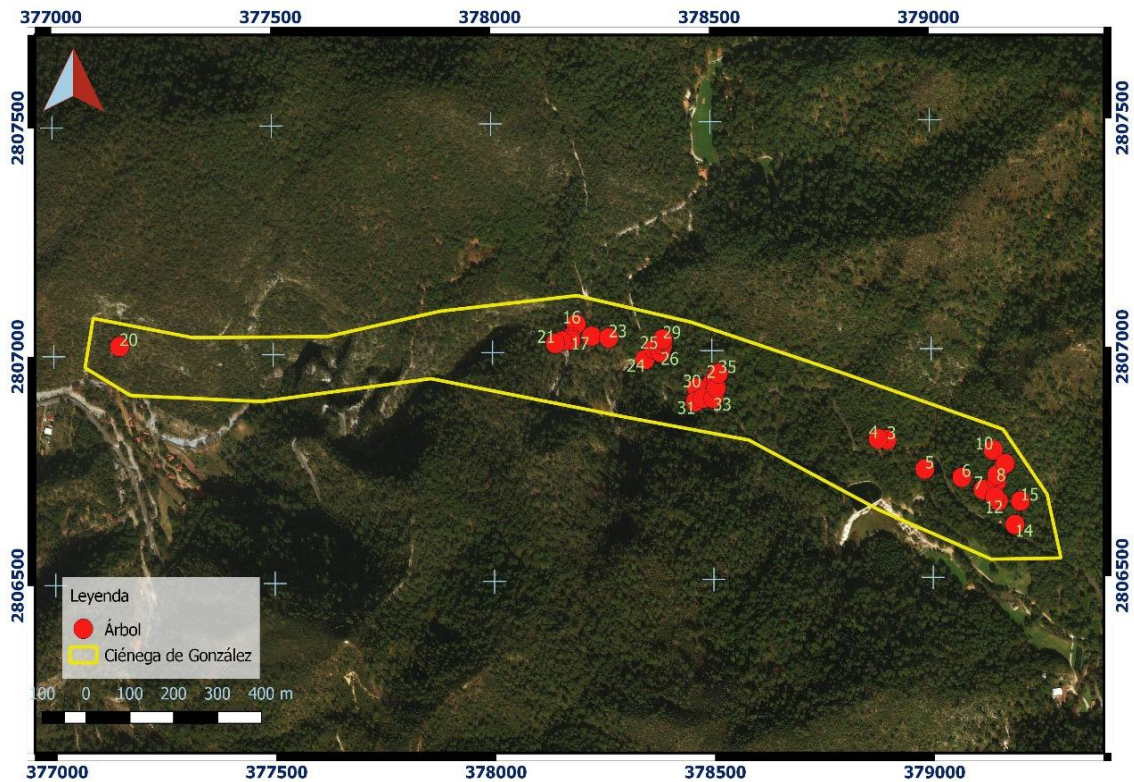


Figura 6. Área de estudio para la determinación del potencial dendrocronológico en el ejido Ciénega de González, municipio de Santiago, Nuevo León.

El área se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, sub-provincia de la Gran Sierra Plegada; constando de una serie de sierras menores de estratos plegados, formando cañones, amplios valles y zonas de topografía accidentada (Rzendowski, 1978).

6.1.1 Suelo y vegetación del área de estudio

La edafología pertenece a un suelo de tipo Litosol caracterizado por suelos someros, bajo el cual subyace roca dura continua (Clasificación FAO-UNESCO, 1998). Según Rojas (1965) el Parque Nacional Cumbres de Monterrey ocupa el segundo lugar en el país con mayor concentración de pinos y encinos, las especies que se distribuyen en el parque son: *Abies spp.*, *Abies vejari.*, *Arbutus sp.*, *Cercis canadensis.*, *Dasyllirion sp.*, *Lippia sp.*, *Picea sp.*, *Pinus strobiformis.*, *P. cembroides.*, *P. greggii.*, *P. hartwegii.*, *P. pinceana.*, *P. pseudostrobus.*, *P. rudis.*, *P. teocote.*, *Quercus fusiformis.*, *Q. greggii.*, *Q. hipoxlanta.*, *Q. laeta* y *Q. saltillensis.*

6.1.2 Clima

De acuerdo con el sistema climático de Köppen, modificado para la República Mexicana por García (1973), el clima en esta región se caracteriza como semi-seco y semi-cálido. La precipitación media anual es de 629 mm, con una estación interstival seca. En general, las lluvias presentan gran fluctuación, tendiendo a ser extremas. La época mayor humedad se presenta en el periodo mayo-octubre. Respecto a la temperatura, el promedio anual es de 17°C, siendo junio, julio y agosto los meses que presentan temperaturas de hasta 21°C en promedio. Enero es el mes más frío con temperatura media de 12°C, por otro lado, las heladas pueden ocurrir en el período de diciembre a marzo (García, 1973).

6.2 Metodología de campo

6.2.1 Tipos de muestro y obtención de las muestras

Se seleccionaron rodales de bosques mixtos de coníferas en los cuales se realizó un muestreo selectivo de los individuos de la especie de *Pinus teocote* (Figura 7). Los criterios para la selección de individuos fueron que estuvieran localizados en laderas con alta insolación, especímenes que tuvieran de preferencia un fuste cilíndrico para evitar problemas de liberación y compresión, arraigados a suelos someros y con de apariencia longeva, lo cual se presume tiene más potencial

para generar series dendrocronológicas lo más extenso posible y con alta sensibilidad climática (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Constante-García, 2015).



Figura 7. Prototipo de *Pinus teocote* con las características adecuadas para la extracción de núcleos de crecimiento

Se extrajeron 75 núcleos de crecimiento a una altura de 0.4 m de *P. teocote*, con un Taladro de tipo Pressler marca Hågloff de 0.5 mm de diámetro interno (Figura 8). Cabe resaltar que distintos autores mencionan que para poder desarrollar una cronología el número de muestras está dentro de 30 a 40, y al aumentar el tamaño del muestreo permite disminuir la intensidad de las señales específicas del árbol (ruido) y enfatizar la señal a gran escala (Briffa y Jones, 1990).



Figura 8. Extracción de núcleo de crecimiento de *Pinus teocote* próximo a la base a una altura de 0.40 m. con el taraldro de Presler marca Hägloff

Se extrajeron de manera perpendicular a la pendiente para evitar los efectos de compresión y tensión, además de que contienen una mayor variabilidad al extraer los núcleos en pendiente (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Figura 8). Asimismo, se registró para cada muestra la especie, las coordenadas geográficas del árbol, el diámetro normal y la altitud sobre el nivel del mar. Una vez extraídas las muestras se guardaron en popotes de plástico para evitar que se torcieran por pérdida de humedad hasta su procedimiento en el laboratorio (Stokes y Smilley, 1968) (Figura 9).

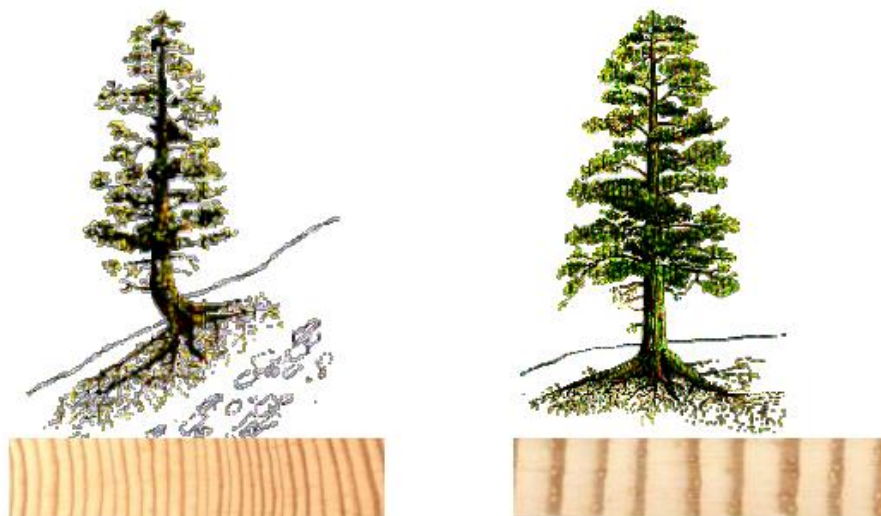


Figura 9. Series de anillos sensibles (izquierda) y complacientes (derecha). Las series de anillos complacientes muestran una baja variabilidad, por ejemplo, en el grosor, tal y como muestra la figura (Stokes y Smiley, 1968).

6.3 Trabajos de laboratorio

6.3.1 Preparación de las muestras

Las muestras se procesaron mediante técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968) en el Laboratorio de Dendrocronología de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FCF-UANL). Primeramente, las muestras se montaron con pegamento en molduras de madera acanaladas, cuidando que las fibras quedarán en posición perpendicular a los anillos de crecimiento sujetándolos con cinta adhesiva para evitar que se torcieran durante el proceso de secado por efectos de la pérdida de humedad. Posteriormente, se lijaron con diferentes grados de lijas (120 a 1 500) y se pulieron de forma manual para facilitar la observación de los anillos de crecimiento a través de un estereomicroscopio (Villanueva-Díaz et al., 2018) (Figura 10).



Figura 10. Montaje de las muestras *Pinus teocote* para su análisis dendrocronológico.

6.3.2 Análisis de las muestras

Pre-fechado

Es un proceso básico para la posterior medición de los anillos de crecimiento, este procedimiento consiste en determinar el año exacto en el cual se ha formado cada anillo, mediante la aplicación de técnicas convencionales estándares (Stokes y Smiley, 1968). Para llevar un mejor control se contaron los anillos de crecimiento y se marcaron en cada serie de crecimiento las décadas, los medio siglos y los siglos (Constante García *et al.*, 2009) (Figura 11).



Secuencia de
década (denotada
por un punto) y
medio siglo (dos
puntos)



Figura 11. Conteo preliminar de los anillos, con punto se marcan las décadas, dos puntos los medio siglos y con tres puntos los siglos.

Sincronía de los anillos de *Pinus teocote*

La comparación por coincidencias de los patrones de anillos de crecimiento de diferentes series o árboles que crecieron en la misma época, en el mismo sitio, bajo las mismas condiciones medioambientales, se denomina *crossdating* (datación cruzada o cofechado en español) (Figura 12). La datación cruzada o el cofechado se conoce como el principio más importante de la dendrocronología y está basada en el hecho que los factores ambientales afectan el crecimiento de todos los árboles de un sitio en forma similar. Es decir, los anillos de los árboles reflejan una respuesta común a un factor ambiental. Una correcta sincronización de los anillos de crecimiento deriva en una adecuada datación de estos (Fritts, 1976; Giraldo Jiménez, 2011). El proceso de crossdating primero se realizó entre muestras de un mismo individuo y posteriormente se comparó con las demás muestras.

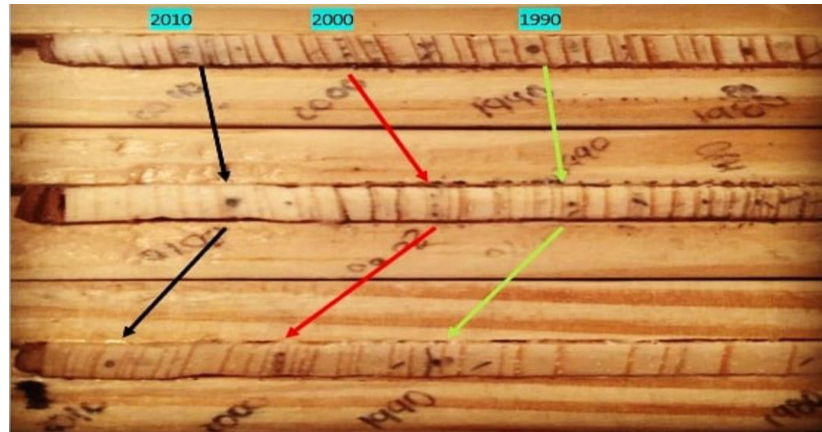


Figura 12. Sincronía de las muestras

6.3.3 Medición de las muestras

El proceso de medición se realizó utilizando un micrómetro de precisión al 0.001 mm, equipo que consta de una platina de fase deslizable marca Velmex conectada a una computadora (Figura 13) (Robinson y Evans, 1980). El programa para medición usado fue el MEASUREMENT-J2X para Windows. La medición constituye uno de los pasos más importantes para poder utilizar programas subsecuentes, relacionados con la calidad del fechado y proceder al desarrollo de índices dendrocronológicos. El proceso de medición debe ser correctamente realizado, de tal manera que conlleve a una determinación confiable del crecimiento anual (Stikes y Smiley, 1998).



Figura 13. Equipo de medición de los anillos de crecimiento mediante el sistema Velmex. Laboratorio de dendrocronología de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL.

Al terminar la medición de todas las series de crecimiento el programa genera un archivo de salida en formato RWL (Ring Width List, por sus siglas en inglés) que será empleado en los programas consecuentes.

6.3.4 Análisis del fechado por medio del programa COFECHA

El archivo RWL de medición fue analizado por el programa COFECHA incluida en la librería de DPL Programas (Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona por sus siglas en inglés) (Holmes, 1983). Es un software de control de calidad del fechado y es uno de los más importantes para el desarrollo de series dendrocronológicas (Grissino Mayer, 2001). El programa, a través del archivo de medición compara estadísticamente el fechado de cada muestra al correlacionar sucesivamente segmentos de 50 años con traslapes de 25. El programa detecta aquellas series cuya correlación sea <0.3281 ($P < 0.001$) establecido por Holmes (1983) como mínima correlación.

El programa COFECHA, generó información sobre el análisis del control de calidad del fechado, en donde fue posible la detección de posibles problemas que requirieron modificación en determinados segmentos de la muestra. Los factores a los que se le atribuyeron la existencia de problemas fue por las condiciones de crecimiento y el fechado de la muestra.

Además, presentó información sobre la extensión de la cronología, la sensibilidad media, el resumen de los anillos ausentes y la correlación entre series, siendo este el parámetro que valida estáticamente el control de calidad con un nivel de significancia de 99%.

La realización de éste procedimiento permitió una buena calidad del fechado, finalizando con la etapa del datado.

6.3.5 Generación y evaluación de la cronología

Para poder trabajar con anillos de crecimiento y datos climáticos se requiere la transformación o eliminación del ruido dentro de las series, para ello es importante explicar las diferentes variables que influyen en un anillo de crecimiento anual (Constante-García, 2015).

Cook (1987) expuso cinco señales importantes para la determinación de los anchos de anillos de crecimiento, expresadas en la siguiente ecuación:

$$Rt = At + Ct + D1t + D2t + Et$$

(Grissino Mayer, 2001)

Donde ***Rt*** es la serie de valores del ancho de anillo (medido) durante el año en cada árbol determinado (*t*); ***At*** es cuando el crecimiento en diámetro de los árboles debido a la edad implica mayor área basal; ***Ct*** son las series de residuos y representa la relación en el anillo de crecimiento y las variables climáticas ambientales, que a su vez sirven para el desarrollo del árbol; ***D1t*** consta de los factores de disturbios endógenos que afectan a los árboles, de tal modo que el crecimiento se ve afectado por la supervivencia o competencia entre individuos del mismo rodal; ***D2t*** se refiere a los factores de disturbios exógenos fuera del

rodal que afectan los anillos de crecimiento tales como; insectos, defoliación, incendios forestales, exposición, vientos y contaminación atmosférica. & es un indicador binario asociado con D1 y D2 de presencia (& = 1) ó ausencia (& = 0) de disturbios en las series, es decir, la aleatoriedad en la presencia o ausencia de disturbios endógenos o exógenos; *Et* es la variación no explicada por los otros factores, que se podría deber a diferencias en fertilidad de suelo, dentro de los sitios, gradientes en las características del suelo o bien errores en la medición.

El programa utilizado para minimizar la influencia biológica en los crecimientos fue la Estandarización Autorregresiva (ARSTAN por sus siglas en inglés) incluido en la librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona. El método de ARSTAN fue desarrollado específicamente para eliminar los efectos endógenos de la dinámica forestal y preservar la señal climática. Por esta razón, se utilizó la estandarización ARSTAN del programa ARSTAN (Cook, 1985).

La función del programa es producir cronologías de series de anillos de crecimiento a través del proceso conocido como “detrending”, metodología que implica la eliminación del ruido en las series de crecimiento mediante la fijación de modelos matemáticos como una curva exponencial, curva flexible etc., para finalmente derivar en índices, que son generalmente mediante la estandarización o normalización de las series (Grissino Mayer, 2001).

Este proceso generó tres cronologías 1) Estándar, 2) Residual y 3) ARSTAN. Luego se normalizaron los datos obtenidos con relación al modelo exponencial ajustado que interpreta los cambios en el ancho del anillo.

El modelo de una exponencial negativa es:

$$y_t = a^{e^{-bt+k}}$$

(Grissino Mayer, 2001)

Donde:

y_t = Al crecimiento esperado para un año dado (t); a , b y k son los coeficientes de regresión, que varían de serie a serie, de acuerdo a la pendiente de la curva en el dato a ajustar: t es el tiempo que varía de 1 a n ; en tanto que e es la base de logaritmos naturales.

De esta manera cada serie por separado creó un índice, al dividir el valor de la anchura del anillo medido con el micrómetro, entre el crecimiento esperado para el año “ t ”, dado por el modelo exponencial negativo, o bien el valor de la curva o recta que aplicó el programa a cada serie de medición (Cook y Holmes, 1984).

La ecuación para estandarizar es:

$$I = W/Y$$

(Grissino Mayer, 2001)

Donde:

I = Índice de crecimiento estandarizado.

W = Ancho del anillo medido con el micrómetro.

Y = Ancho de anillo obtenido con la ecuación exponencial negativa.

De esta manera, para cada muestra se generó un índice para cada anillo de crecimiento, de acuerdo al ajuste realizado al aplicar rectas de regresión o curvas exponenciales.

La estandarización permitió obtener las medias de los crecimientos de cada serie igual a 1.0 y una varianza estable, de esta forma se compararon árboles longevos y jóvenes (Cook y Holmes; 1984).

Para poder correr el programa ARSTAN se requiere la base de datos de medición de anillo total con un fechado previamente verificado con el programa COFECHA, esta base de datos debe presentar un formato **.dat** que es el formato que reconoce ARTAN para Windows. Durante la ejecución de programa se despliegan mensajes cortos que alertan sobre el proceso del análisis. Los resultados completos de la corrida del análisis aparecen en diferentes archivos

(nueve archivos, *.COE, *.CRN, *.CV, *.EV, *.NRA, *.NTR, *.OUT, *.PC y *.SD) siendo dos de los archivos de salida fundamentales y en lo que hay que presentar especial atención son: el que contiene las cronologías (.CRN) y el archivo de salida (*.OUT). Con el archivo *.CRN se extraen los datos para graficar el spline y las cronologías Estándar, Residual y ARSTAN con el programa FMT (Manipulate data and or change format por sus siglas en inglés) y con los valores de los parámetros que se encuentra en el archivo de salida (*.OUT) se procedió a determinar la cronología con el mayor ajuste.

6.3.6 Criterios de evaluación de la cronología de *Pinus teocote*

Los estudios enfocados para evaluar el potencial dendrocronológico, se basan principalmente en cuatro criterios básicos: la sensibilidad media, la desviación estándar, la auto-correlación de primer orden y la proporción señal ruido. Sin embargo, también se toman en cuenta otros parámetros estadísticos como la cantidad de problemas que presentan las muestras a la hora del fechado y la asociación de las series de crecimiento, es decir, la intercorrelación entre series. En este sentido, se explican los parámetros dendrocronológicos que se generan a partir del análisis de las series de crecimiento en los programas básicos para el desarrollo de estudios dendrocronológicos (COFECHA y ARSTAN). La descripción de los mismos y las ecuaciones dadas para cada una, en general son tomadas de los estudios de Fritts (1976) y (Grissino Mayer (2001).

Sensibilidad media

En general, éste estadístico es de uso específico y calcula la variación entre un anillo de crecimiento y el inmediato, considerándose como un indicador de la variabilidad interanual; de tal manera, que el valor de éste refleja los cambios de corta variación o bien de alta frecuencia, y cuyo origen radica en cambios ambientales (climáticos y biológicos) (Constante,2015).

La fórmula para determinar la Sensibilidad Media es:

$$sm = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=m-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

Donde:

sm = Sensibilidad Media.

x_t = Anchura de anillos en el año t.

x_{t+1} = Anchura del anillo en el año posterior a t (anillo contiguo).

n = Número de muestra.

Valores bajos indican que la especie tiende a ser complaciente o bien, presenta una tendencia a producir anillos muy similares entre sí, con baja variación, por lo que sus crecimientos describirían poco la variación climática; mientras que un valor alto, representa a especies sensibles de gran importancia en estudios dendroclimáticos, dicho lo anterior valores de 0.65 se presentan en especies muy sensibles y de 0.15 para especies poco sensibles.

Desviación estándar

Gutiérrez (2004) menciona que es una medida de la variación de los datos de alrededor de la media y es considerada el resultado de dos grandes influencias: factores operando en todo el bosque y factores a escala pequeña que actúan en árboles individuales a alguna parte del árbol. Generalmente los valores de este parámetro oscilan entre 0.3 a 0.8.

La fórmula para determinar la desviación estándar es:

$$Sx = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=n}^{t=n} (X_t + m_t)^2}$$

Donde:

Sx = Desviación estándar.

X_t = Anchura de anillos en el año t.

m_t = Media del conjunto de mediciones de anchura de anillos.

n = Número de muestra.

Auto-correlación

Se refiere a que el crecimiento de las especies arbóreas está fuertemente influido por el año anterior, también llamado persistencia.

En dendrocronología es común encontrar el término denominado autocorrelación de primer orden o Lag-1, principalmente porque el proceso fisiológico en los árboles crea un Lag o retraso en respuesta al clima, y también porque las anomalías del clima persisten de un año al siguiente. Las series de anillos de árboles representan esta correlación denominada de primer orden o Lag-1. Ocurre porque el proceso fisiológico en árboles crea un Lag o retraso en respuesta a las variables climáticas. Valores altos de intercorrelación y sensibilidad media, se asocian con una baja autocorrelación (Constante, 2010).

La fórmula utilizada para calcularla esta autocorrelación entre los anillos anuales es la siguiente:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^{t=m-1} (X_t + m_x)(Y_t + m_y)}{(n - 1)S_x S_y}$$

r_{xy} = Correlación promedio.

X_t = Anchura de anillos en el año t.

m_x m_y = Media del conjunto de mediciones de anchura de anillos.

S_x S_y = Desviación estándar de las mediciones de anchura de anillos.

n = Número de muestras.

Los valores que comúnmente se presentan oscilan entre 0.6 y 0.8, mientras que los valores bajos se dan en un rango de 0.3 a 0.5 indicando que especies que

presentan estos valores tienen una alta sensibilidad, por otra parte, los valores por arriba de 0.9 indican que el crecimiento de un año específico está influenciado por el crecimiento ocurrido hasta dos años previos.

Proporción señal ruido

Es la relación existente entre el factor señal que en una serie de anillos es la información de interés, y el ruido o la información irrelevante que perturba la expresión de la señal en una determinada cronología. La varianza de los resultados anuales de una cronología, se debe a dos tipos de factores, los de gran escala que afectan al bosque en conjunto, y los factores a pequeña escala que afectan individualmente a los árboles o en determinados sitios. Algunos factores del ruido que interviene en la señal de variabilidad climática son: edad, dinámica del bosque, competencia, fenología, daños dentro y fuera del rodal. (Wigley et al., 1984).

Inter-correlación entre series

Es la relación que existe entre la influencia de la señal climática y todas las series de crecimiento de los árboles en el sitio y representa la confiabilidad de la cronología. Los valores para este parámetro oscilan entre 0.4 a 0.9, sin embargo, la mayoría de las cronologías en general muestran valores que oscilan entre 0.55 y 0.75 (Constante, 2010).

Problemas de crecimiento

Se refiere a los problemas que presentan las series de crecimiento o bien a la baja sincronía entre los anillos de diferentes muestras para un mismo periodo. Esta variable se ve directamente reflejada en la correlación, de tal modo que lo ideal es tener series de crecimiento sin ningún problema, es decir, series con una

alta sincronía entre los crecimientos anuales (Villanueva et al., 2008 y Constante, 2010).

Para que una cronología pueda considerarse con potencialidad para análisis dendroclimáticos, esta debe presentar valores altos en los parámetros de correlación entre series, sensibilidad media, desviación estándar y relación señal ruido, y un valor bajo en el parámetro autocorrelación (Delgado, 2000).

6.3.7 Función de respuesta o relación clima-crecimiento en *Pinus teocote*

Fritts (1976) menciona que los crecimientos del árbol son la respuesta a un conjunto de factores, siendo uno de estos factores el que domina y limita el crecimiento de tal manera que define en gran medida su desarrollo. Para México (Villanueva Díaz et al., 2015) y sur de Estados Unidos (Cleaveland et al., 2003) mencionan que el factor limitativo de crecimiento en la región es la precipitación (Villanueva-Díaz *et al.*, 2018).

La función de respuesta de la especie clima-crecimiento de *P. teocote* se calculó con los datos climáticos registrados en las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudios (Cuadro 1). Luego se relacionó el índice de ancho de anillo con las variables climáticas (precipitación y temperatura).

Las variables climáticas que se consideraron fueron la precipitación mensual total en milímetros, la temperatura máxima y mínima mensual en grados centígrados.

Los datos de precipitación y temperatura utilizados en la asociación con el índice de ancho anillo fueron obtenidos de El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y de datos obtenidos del software Eric III (IMTA, 2000) a partir de procesos de regresión múltiple (Villanueva-Díaz *et al.*, 2018)

Cuadro 1. Datos de la precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

Estaciones climáticas	Latitud(O)	Longitud(N)	Periodos de datos
Laguna de Sánchez	25,3461n	-100,2711w	1947-2015 (68 años)
Iturbide	24.733n	-99.917w	1940-2001 (61 años)
Santiago	25,43333n	-100.1694w	1923-1972 (50años)
Allende	25.283n	-100.033w	1961-2001 (40 años)
Montemorelos	25.189n	-99.8302w	1927-2016 (89 años)

7 RESULTADOS

7.1 Análisis del programa COFECHA y ARSTAN

En el muestreo se recolectaron 75 núcleos de crecimiento de *P. teocote*, De éstas, se seleccionaron aquellas que presentaran crecimientos semejantes, de tal manera, que el análisis se realizó con 33 individuos, utilizando 66 muestras permanecientes al 88% de las muestras totales; indicando que éstas fueron fechadas y medidas perfectamente ($p < 0.01$) superando a la correlación mínima de $r = 0.3281$ establecido por Holmes (1983). Por otra parte, el 12% restante de las series fue descartado debido a que presentaron problemas en el crecimiento radial, anillos falsos y/o ausentes.

La serie dendrocronológica de ancho de anillo total generada por COFECHA se presentó en un periodo de 137 años, de 1881 a 2017. La intercorrelación entre serie fue de 0.64, la sensibilidad media fue de 0.61 mientras que la longitud media de las serie fue de 87.1 años (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valor de los parámetros dendroclimáticos obtenidos en el Programa COFECHA para determinar el potencial dendrocronológico de *Pinus teocote*.

Parámetro	Valor
Especie	<i>Pinus teocote</i>
Número de series datadas	66
Serie maestra 1881-2017	137 años
Anillos totales en todas las series	5746
Total de anillos fechados controlados	5737
Intercorrelación entre serie	0.642
Sensibilidad media promedio	0.619
Longitud media de series	87.1

El patrón de crecimiento de las muestras presentó anchos de anillos superiores a la media. Los anchos de anillos de los años 1980 y 2010 obtuvieron valores altos, los cuales están a la presencia de los huracanes Gilberto y Alex respectivamente, donde las precipitaciones aumentaron considerablemente. Por otra parte, se localizaron anchos de anillo con valor bajo, lo cual está relacionado con el incendio de 1998 en el área de estudio (Figura 14).

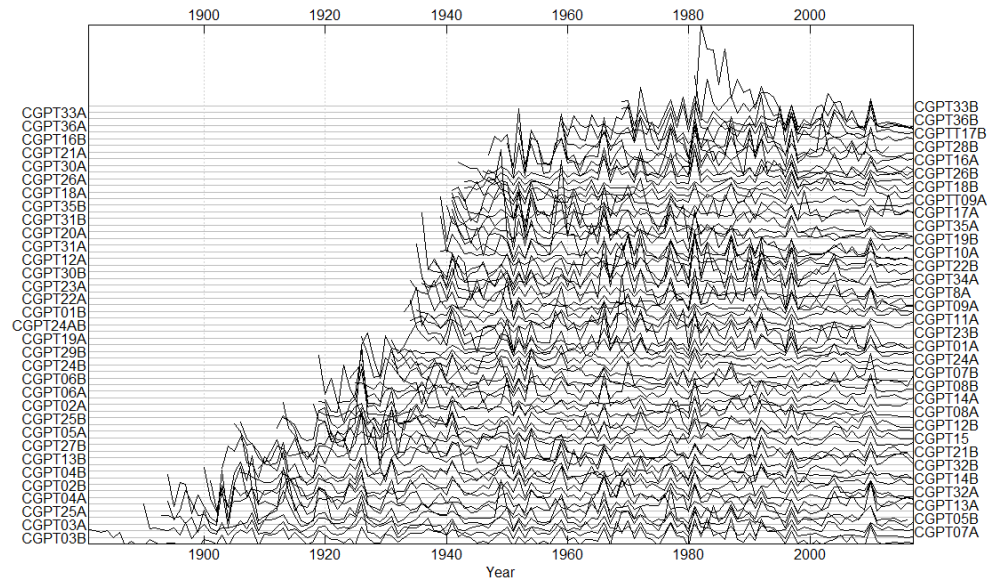


Figura 14. Patrón del crecimiento representado por el ancho de anillo total de cada serie medida para *Pinus teocote*.

Las tres cronologías generadas por el programa ARSTAN (Estándar, Residual y ARSTAN) se emplearon para identificar el periodo de función de respuesta del crecimiento radial al clima (Figura 15). La línea sólida en azul corresponde a los índices anuales; la línea roja es una línea suavizada que para resaltar eventos de alta y baja frecuencia (spline); la línea negra horizontal corresponde al valor de la media 1, y la línea negra punteada constituye el número de muestras utilizadas.

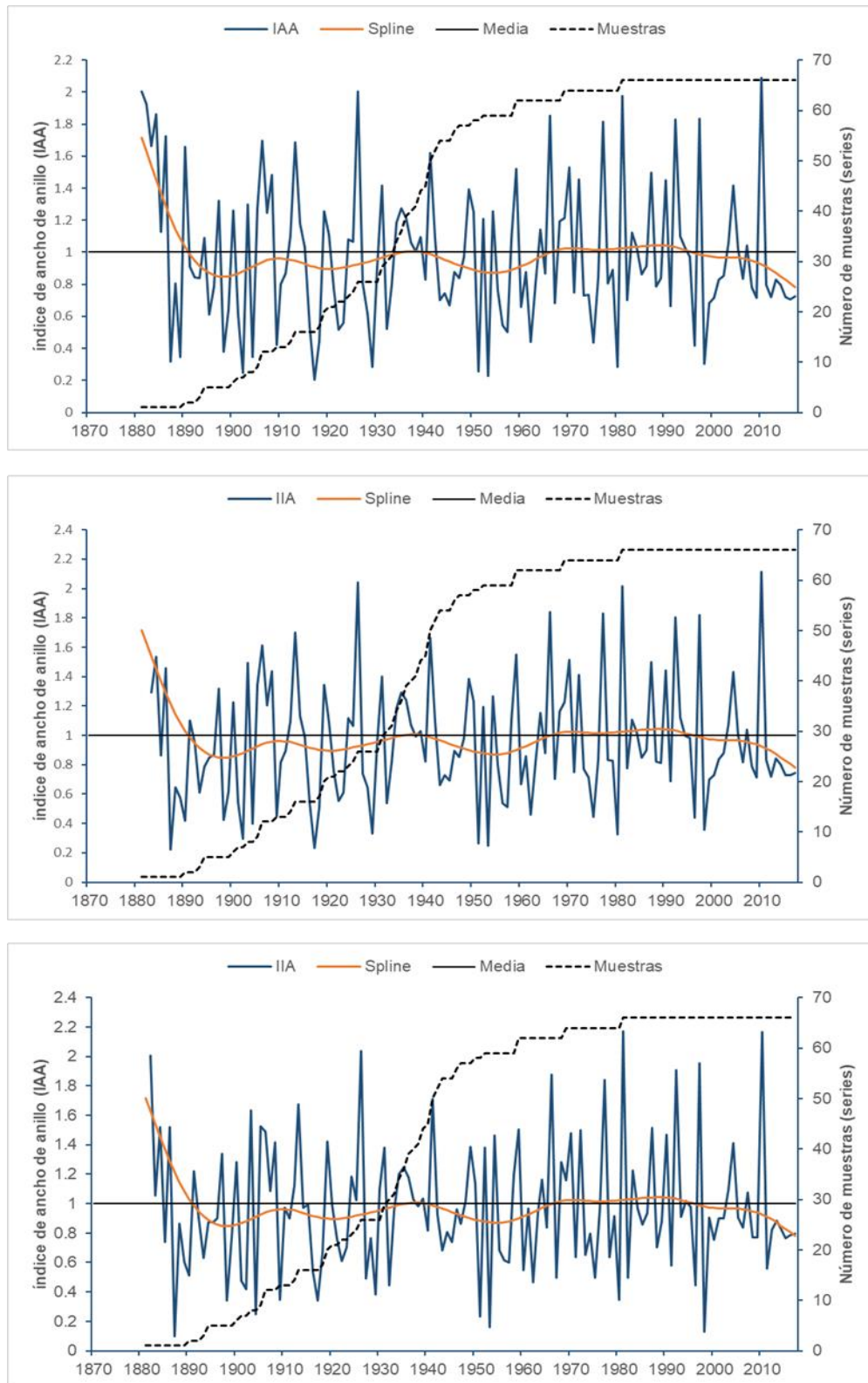


Figura 15. Cronologías generadas por el programa ARSTAN a) Estándar, b) Residual y c) ARSTAN.

Las tres cronologías mostraron tendencias en años húmedos y sequías en años específicos. Las sequías se registraron en los años 1902, 1917, 1929, 1953, 1980, 1996, 1998, 2009 y 2011. En cambio, los periodos húmedos se presentaron en los años 1941, 1959, 1966, 1977, 1992, 2004, 2010 y 2016.

El programa ARSTAN al integrar todas las series genera información que permite identificar la cronología que tiene el mejor ajuste en base a la medición de los anillos de crecimiento.

La cronología estándar presentó mejor a la respuesta climática de la especie estudiada, con una media de 0.979, sensibilidad de 0.507 mientras que la relación señal-ruido 36.505 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros estadísticos del programa ARSTAN.

Estadísticas	Cronologías		
	Estándar	Residual	ARSTAN
Media	0.979	0.9534	0.9683
Desviación estándar	0.4348	0.4035	0.4319
Sensibilidad Media	0.5078	0.5004	0.5545
Auto correlación de segundo orden	0.0906	-0.0064	0.0257
Relación señal ruido	36.505	36.097	-

7.2 Análisis Crecimiento-Precipitación

Al realizarse el análisis de correlación entre el índice de anillo de la cronología que mejor se ajustó con los datos climáticos (precipitación) mostrando una correlación de $r=0.57$ en otras palabras los crecimientos explican el 57% de la precipitación que se presenta en la región.

El análisis de correlación de Pearson para comparar la cronología en su versión estándar con los valores de la precipitación mensual. El periodo de precipitación que más influye de manera significativa en el crecimiento de los anillos de crecimiento de *Pinus teocote*, siendo el lapso estacional de invierno-primavera quien más significancia obtuvo ($P < 0.001$). Por otra parte, los meses de agosto a diciembre las correlaciones se presentaron de manera negativa siendo este periodo menor significativo (Figura 16).

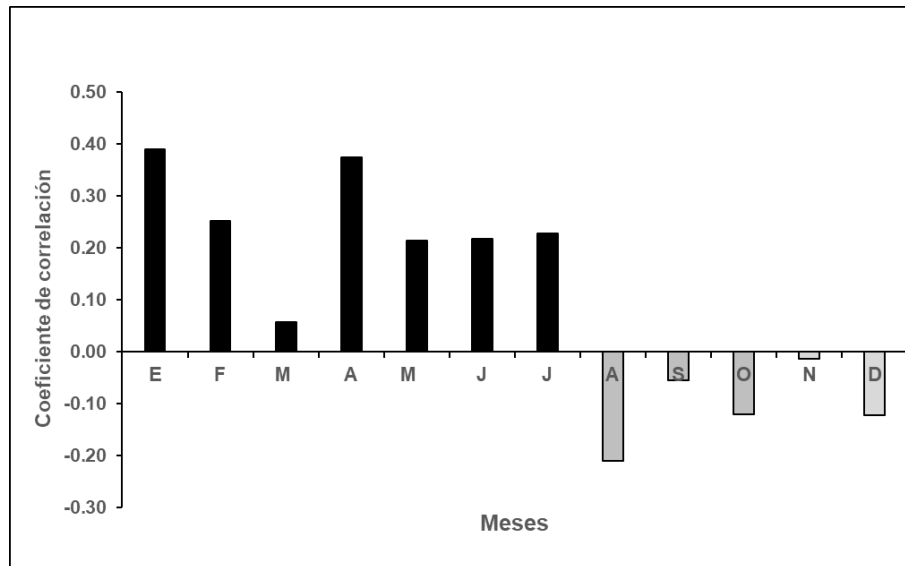


Figura 16. Correlación entre los meses de precipitación y el índice de anillo total. Las barras en color negro indican correlaciones positivas en el periodo de enero a julio, mientras que las barras de color gris indican correlaciones negativas agosto-diciembre.

Posteriormente, se realizó este mismo procedimiento para determinar el periodo en el que la precipitación acumulada muestra una mayor significancia. Los periodos de enero-abril y enero-mayo presentaron una mayor correlación con los índices de la cronología estándar con 0.46 y 0.45 ($p < 0.01$) respectivamente. Por lo tanto, se puede indicar que el crecimiento de los anillos de la especie está influenciado con la precipitación que se presenta en época fría del año (Figura 17).

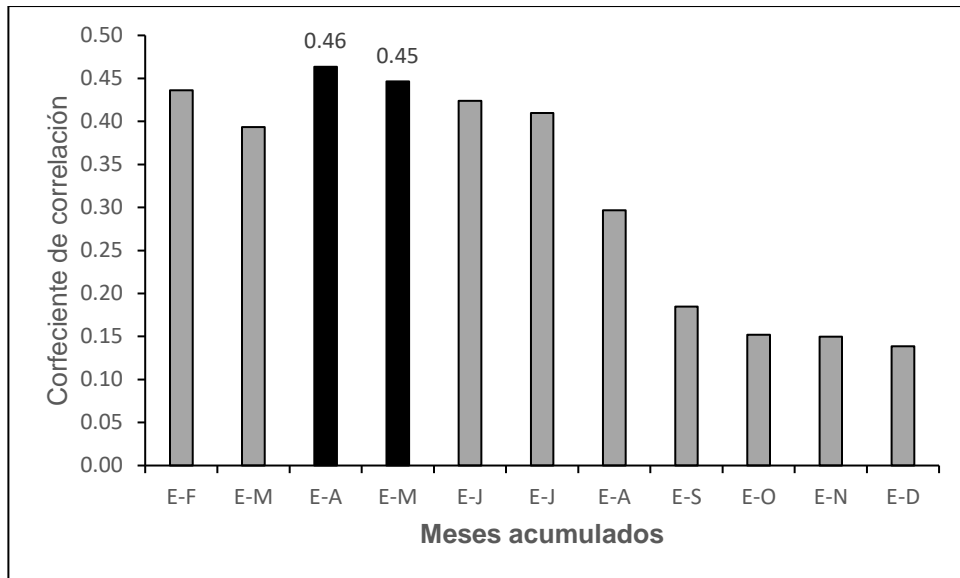


Figura 17. Correlación de Pearson entre los valores de la precipitación acumulada y los índices de la cronología en su versión estándar. Las barras de color negro indican que los meses acumulados de enero-abril y enero-marzo presentan una correlación positiva, es decir los anchos de anillo son mayores en los periodos mencionados.

El valor de correlación entre la precipitación acumulada y el índice de la cronología estándar se presentan de manera positiva en cada uno de los periodos, indicando que existe una respuesta positiva entre el crecimiento de los anillos de crecimiento de *Pinus teocote*. En base a lo anterior los periodos de enero-abril y enero-marzo indicaron una mayor correlación y explican el 46 y 45% de los crecimientos respectivamente (Figura 18 y 19).

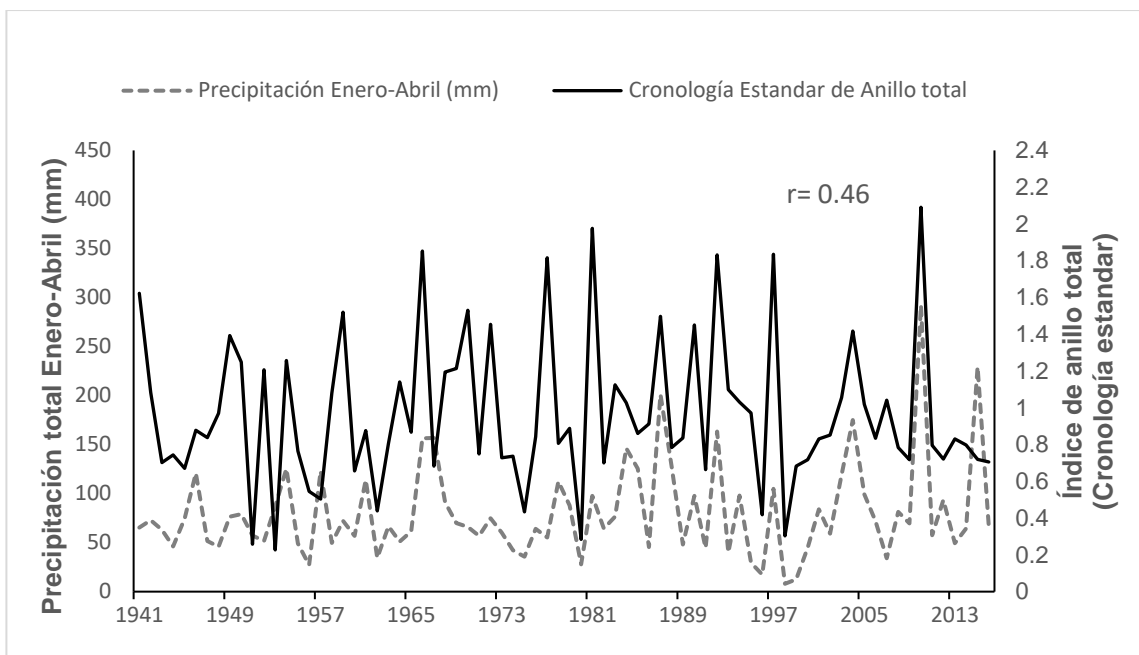


Figura 18. Asociación de la cronología estándar de anillo total con la precipitación total de enero-abril

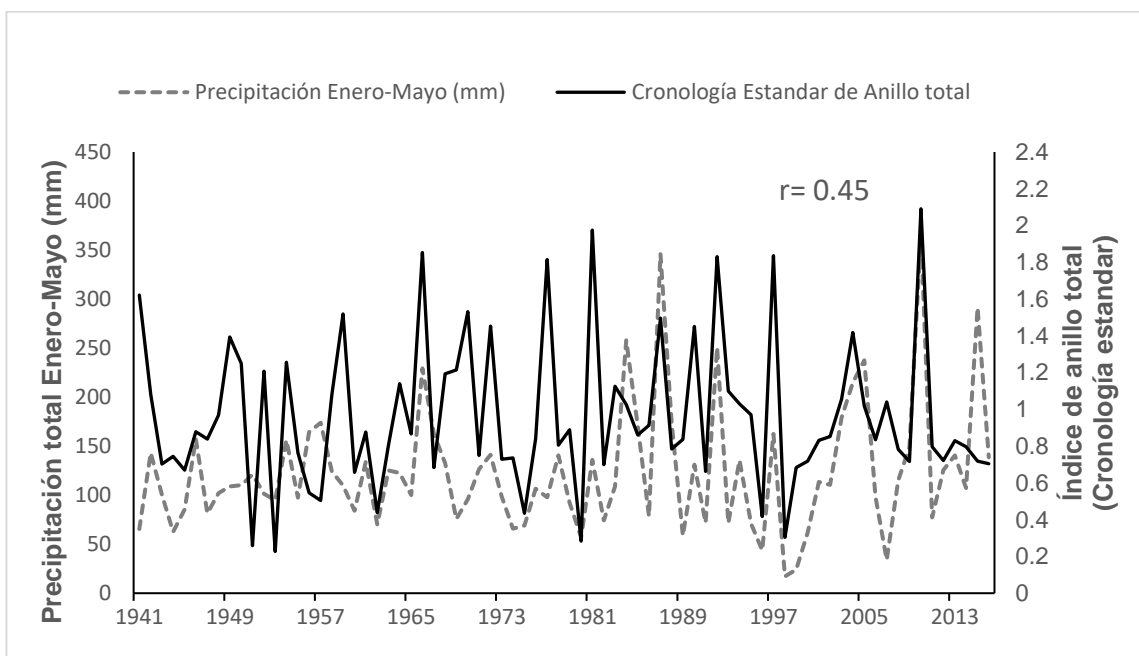


Figura 19. Asociación de la cronología estándar de anillo total con la precipitación total de enero-mayo

7.3 Análisis Crecimiento - Temperatura

Temperatura mínima

La variable ambiental de temperatura mínima se correlacionó con el índice de anillo de la cronología estándar, identificándose los meses de enero, febrero, mayo, julio, septiembre, noviembre y diciembre con correlaciones positivas ($p < 0.01$). Los meses de noviembre y enero los que presentaron mayor correlación de $r=0.18$ y $r=0.16$ respectivamente, explicando un 18 y 16% del crecimiento en base a la temperatura mínima. Por otra parte, los meses de marzo, abril, julio, agosto y octubre presentaron correlaciones negativas, es decir el crecimiento radial de *P. teocote* no es significativo (Figura 20).

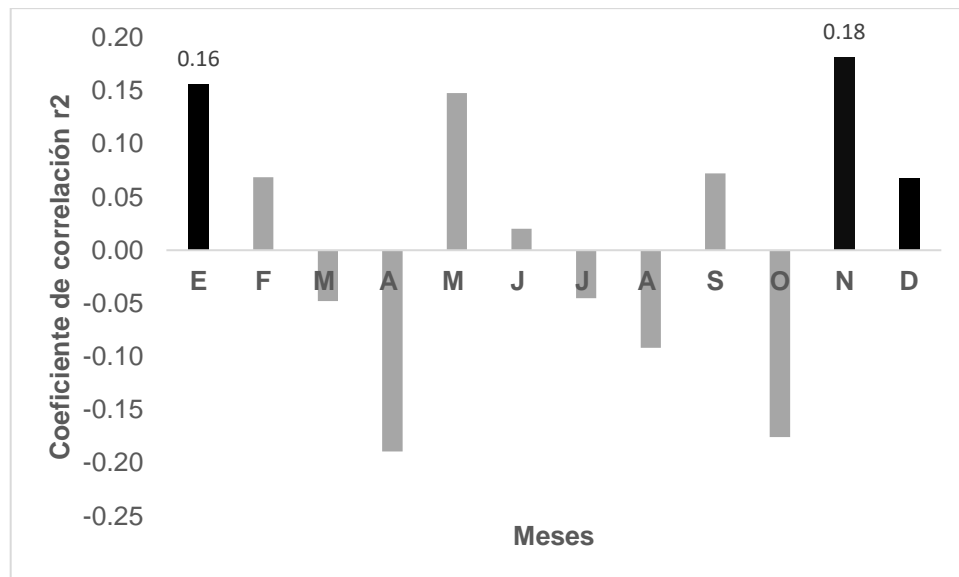


Figura 20. Correlación del índice de anillo de la cronología estándar con la temperatura mínima. Las barras de color negro indican que la temperatura mínima en los meses de enero, noviembre y diciembre, el crecimiento de los anillos es significativo.

Al presentar las mayores correlaciones los meses de noviembre y enero se efectuó la correlación el índice de la cronología estándar con la temperatura mínima acumulada de estos meses con el fin de conocer el grado de influencia que tiene esta variable a los crecimientos de *P. teocote*. En base a lo anterior, estos meses en conjunto reflejan un 24% del crecimiento radial de la especie (Figura 21).

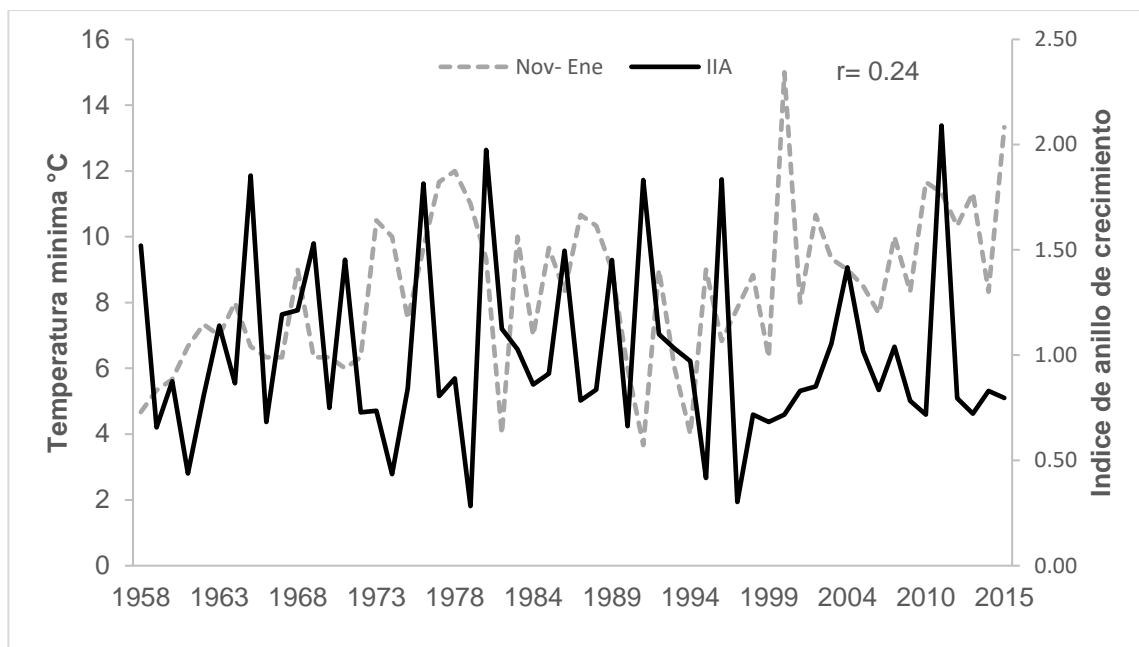


Figura 21. Correlación de Pearson entre los valores de la precipitación mínima de Nov-Ene y la cronología estándar.

Temperatura máxima

Con respecto a la temperatura máxima promedio, los coeficientes de correlación en la mayoría de los meses se presentaron de manera negativa con excepción de los meses de abril y septiembre. Es decir, a medida que aumente la temperatura el crecimiento radial de la especie disminuye (Figura 22).

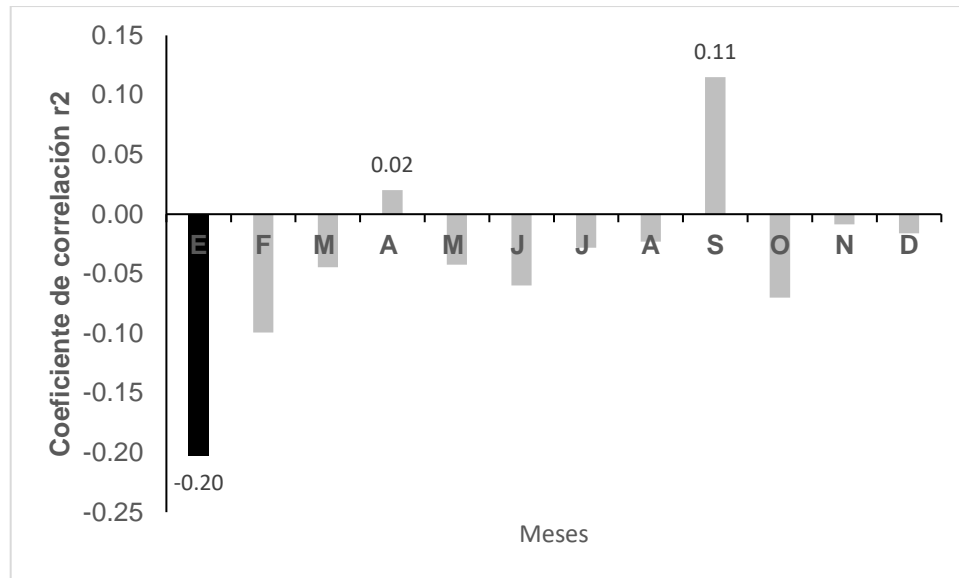


Figura 22. Correlación de Pearson de los valores de la temperatura máxima promedio y la cronología en su versión estándar. La barra de color negro indica que cuando la temperatura aumenta en el mes de enero, los crecimientos anuales no son significativos, siendo la temperatura máxima una limitante para el crecimiento.

En el caso de las correlaciones negativas, el mes que tuvo el valor más alto fue enero con $r=0.20$ ($p<0.01$). Por lo que en este mes existe nulo crecimiento del árbol (Figura 23).

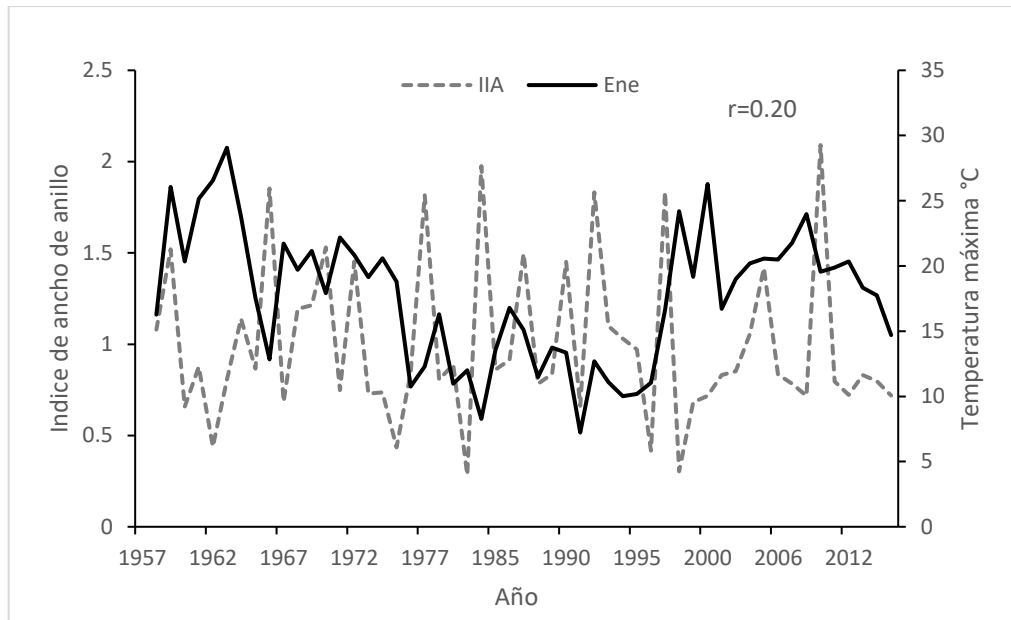


Figura 23. Correlación de Pearson de los valores de la temperatura máxima de enero y los índices de la cronología estándar.

8 DISCUSIÓN

8.1 Evaluación de los parámetros dendrocronológicos de *Pinus teocote*

Intercorrelación entre series

Para la especie de *Pinus teocote* el valor de la intercorrelación fue de 0.64. Demostrando que el valor que se obtuvo para *P. teocote* se encuentra dentro de rango aceptable para el género *Pinus*. El valor de este parámetro coincide con los encontrado por Gutiérrez y Ricker (2019) quienes obtuvieron intercorrelación entre series de 0.67, 0.76, 0.75 y 0.55 para las especies de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote*, respectivamente. En el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, González (2019) y Constante (2010) en Iturbide, Nuevo León, obtuvieron una intercorrelación entre series de 0.59 y 0.72 para la especie de *Pinus pseudostrobus*, respectivamente.

Sensibilidad media

En el caso de la sensibilidad media encontrada para este estudio fue de 0.61, este valor de este parámetro es similar al reportado para diferentes especies de coníferas en sitios de alta montaña en la sierra Madre Oriental (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007, Villanueva-Díaz, 2009). Por otra parte, este valor es superior al encontrado por Gutiérrez y Ricker (2019) para *Pinus teocote* con 0.2 en la Sierra de Peña Nevada. González (2019) encontró que la sensibilidad media para *P. pseudostrobus* en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey es de 0.41. El valor encontrado en este estudio puede considerarse especie sensible, para el caso de valores bajos indican que la tendencia a producir anillos es muy similar, con baja variación, por lo que sus crecimientos describirían poco la variación climática.

Los valores de los parámetros intercorrelación y sensibilidad media indican que la especie *Pinus teocote* tiene potencial determinar la relación descriptiva de la anchura de los anillos con la precipitación y temperatura del pasado en la región.

Autocorrelación de primer orden

Para la especie se obtuvo un valor de 0.09 en la autocorrelación de primer orden, indicando que un crecimiento en específico no está influenciado por el crecimiento ocurrido en el año anterior, es así que valores altos de intercorrelación y sensibilidad media se asocian con una baja autocorrelación por ende la especie presenta una alta sensibilidad. Este valor es similar al reportado por Constante (2014) en el género *Quercus*, en la Sierra de Iturbide y Gutiérrez y Ricker (2019) para dos coníferas en la sierra de Peña Nevada en Nuevo León. Por otra parte, Santillán *et al.* (2010) encontró una autocorrelación de que va desde 0.20 a 0.039 en *Pinus pinceana* en diez sitios distribuidos en el centro y noreste de México, mientras que Villanueva *et al.* (2018) encontraron una autocorrelación de 0.01 a 0.30 para *Pinus lumholtzii* en la Sierra Madre Occidental.

Señal-ruido

Para el caso del parámetro señal-ruido se obtuvo un valor de 35.05, el cual es superior a los reportados por González (2019) con 19.43 para *Pinus pseudostrobus*, Villanueva *et al.* (2015) para *Pinus lumholtzii* con valores de 1.16 a 18.51, Díaz *et al.*, (2016) encontró una señal ruido de 5.24 en *Pinus duranguensis*, mientras que en Constante *et al.* (2009) obtuvieron un valor de 22.94 para *Pinus cembroides*.

Los valores de estos parámetros de este estudio no fueron menores a los generados para diversas especies de coníferas presentes en la Sierra Madre Occidental y en consecuencia no limitan la reconstrucción potencial de variables climáticas (Constante García *et al.*, 2009; Grissino Mayer, 2001; Villanueva Díaz *et al.*, 2008).

8.2 Análisis de la cronología

Se generó una cronología con una extensión de 137 años del periodo 1881-2017, la cual es muy similar al estudio de Gutiérrez y Ricker quienes lograron una cronología de 100 años para la misma especie en la Sierra de Peña Nevada, mientras que para otras coníferas del centro y norte del país las cronologías son más extensas (Cerano Paredes *et al.*, 2013; Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, & Cerano-Paredes, 2016; Mendoza-Villa, Cambrón-Sandoval, Cerano-Paredes, Cervantes-Martínez, y Soto-Correa, 2018; Chávez gándara *et al.*, 2017).

8.3 Relación precipitación-crecimiento

Los resultados del análisis precipitación-crecimiento indican que el crecimiento de *Pinus teocote* en la zona de estudio está principalmente influenciado por la disponibilidad de humedad en el periodo de enero a julio o bien en el periodo estacional invierno-primavera. Lo que es similar a los resultados presentados por Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Villanueva Díaz *et al.*, 2008; Constante García *et al.*, 2009; Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, & Cerano-Paredes, 2016; St. George *et al.*, 2010; Santillán-Hernández *et al.*, 2010; Gutiérrez-García & Ricker, 2019 y Gonzalez, 2019).

Además, los crecimientos coinciden con el periodo de inicio de lluvias en el parque, es por eso la importancia de la humedad durante el inicio de crecimiento de la especie analizada, se manifiesta en los valores de correlación alcanzados en el periodo de enero-julio.

Por otra parte, la precipitación en la época fría se presenta habitualmente en eventos prolongados de baja intensidad, lo que favorece la infiltración de agua en el subsuelo (Seiler y Gat, 2007). Esta infiltración es favorecida por la escasa evaporación, producto de las bajas temperaturas prevalecientes en el invierno. Existen estudios que indican que la precipitación invernal es la principal fuente de recarga de agua subterránea (Dutton *et al.*, 2005; Tang and Feng, 2001), a la

que preferencialmente acceden árboles adultos en bosques templados por medio de raíces profundas (Dawson, 1996; Kerhoulas et al., 2013).

8.4 Relación temperatura-crecimiento

El resultado que surgió al analizar la relación entre la temperatura y el crecimiento resultaron de manera positiva para la temperatura mínima en los meses de noviembre y enero lo cual coincide con lo reportado de Cerano Paredes, Rivera González, Estrada Ávalos, Trucios Cacio, & Ríos Saucedo, 2012; Gutiérrez-García & Ricker, 2019 quienes obtuvieron una correlación significativa para el mismo periodo.

Cuando las temperaturas son bajas están acompañadas por una tasa más baja de evaporación en las mismas regiones y queda una mayor cantidad de agua disponible para las plantas. Caso contrario, cuando existe un déficit hídrico puede inhibir diferentes aspectos del crecimiento del cambium vascular (Kozlowski y Pallardy, 1997).

En áreas donde las condiciones son de baja humedad, se disminuye el tamaño y la diferenciación del cambium, así como la tasa de división de las células y de las células madre de xilema y floema (Kozlowski y Pallardy, 1997) afectando negativamente el crecimiento de los árboles, debido a una disminución en el transporte de fotosintatos a la zona cambial (Dünisch and Bauch, 1994; Gutiérrez García y Ricker, 2019).

Los crecimientos del *P. teocote* con la temperatura máxima respondieron de manera negativa. Esta correlación negativa, se presentó en casi el mismo periodo de respuesta al de la precipitación. Eso se debe a que las altas temperaturas pueden afectar negativamente la cantidad de carbohidratos disponibles destinados a crecimiento arbóreo (Kozlowski y Pallardy, 1997).

Por un lado, la temperatura juega un papel muy importante en los procesos fisiológicos ya que un incremento en la temperatura puede originar una

disminución en la producción de carbohidratos, cuando los árboles en condiciones de alta evapotranspiración capturan menos CO₂ al cerrar sus estomas, para evitar la pérdida de agua (Kozlowski y Pallardy, 1997).

En el quinto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático se han proyectado para las regiones subtropicales, como es el caso del norte de México, condiciones con mayor aridez, debido a una menor precipitación y un aumento de la temperatura (IPPC, 2013). Si las proyecciones del IPPC se cumplen, se tendrían estos posibles escenarios: Un cambio climático pronosticado con temperaturas más altas, precipitaciones más escasas y sequías prolongadas, disminuiría las condiciones favorables para el crecimiento de esta especie y con esto restringiría su distribución a hábitats más reducidos que conservan el microclima óptimo para *P. teocote*.

9 CONCLUSIONES

Los resultados de los parámetros estadísticos del programa COFECHA indicaron que la especie de *Pinus teocote* tiene potencial dendroclimatológico. Por lo mismo se acepta la hipótesis planteada en este estudio, confirmando que los anillos de crecimiento de la especie tienen una respuesta climática significativa en la región.

El análisis de los anillos de crecimiento de *P. teocote* resultó exitoso para generar una serie dendrocronológica en la región debido a las características que estos poseen.

La correlación de la precipitación mensual y acumulada con el índice de ancho de anillo total fue positiva y significativa. Especialmente la precipitación de la época invernal-primavera influyó el crecimiento del siguiente año de la especie en los sitios estudiados. Lo que implica que la precipitación tiene una influencia sobre el desarrollo en los anillos de crecimiento de *P. teocote*.

Los datos obtenidos sirven para reconstruir patrones de precipitación histórica y como base de datos para modelar escenarios futuros.

La evaluación del grado de correlación entre el crecimiento de los anillos anuales y la temperatura ambiental demostró para *P. teocote* que el crecimiento disminuye cuando se presenta una alta temperatura en periodo diciembre-enero, habiendo una baja correlación.

Al ser una especie endémica y con una alta distribución tanto en la Sierra Madre Occidental como Oriental proporciona grandes opciones para analizar y generar registros más extensos a lo largo de México. Por otra parte, la información generada en este estudio contribuye a la ampliación de la red de cronologías en la Sierra Madre Oriental y el país.

El crecimiento de *P. teocote* reaccionó sensiblemente a los cambios de precipitación. Especialmente la falta de humedad se reflejó en un crecimiento reducido. Si los escenarios de cambio climático resultan en una reducción de precipitación y temperaturas más altas en la región, *P. teocote* enfrentará condiciones menos favorables para su desarrollo, al ser una especie forestal más ampliamente distribuida en México, con lo que un aumento del estrés hídrico podría causar reducción de vitalidad, crecimiento y mayor tasa de mortalidad que podrían derivar en la disminución en el rango de distribución. Además, esto traería problemas para el manejo forestal el equilibrio que existe en el ecosistema se perdería originado colonización y extinción de especies o cambios en el hábitat potencial de las especies por el cambio de uso de suelo.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Bernal-Salazar, S., y Terrazas-Salgado, T. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. Madera y Bosques, vol. 6, núm. 1, 2000, pp. 73-86, Instituto de Ecología, AC México.
- Bradley, R. S. 1999. Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary. Academic Press Ltd. London, UK. 614 p
- Carlquist, S. 1988. Comparative Wood Anatomy. Springer-Verlag. Berlin, Germany. 332 p
- Cerano Paredes, J., Méndez González, J., Amaro Sánchez, A., Villanueva Díaz, J., Cervantes Martínez, R., Rubio Camacho, E.A., 2013. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la reserva de la biosfera sierra de manantlán, Jalisco. Rev. Chapingo, Ser. Ciencias For. y del Ambient. 19, 413–423. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.02.007>
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R.D., Méndez González, J., Constante García, V., 2011. Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. Rev. Mex. Ciencias Agrícolas 2, 235–249.
- Cerano Paredes, Rivera González, M., Estrada Ávalos, J., Trucios Cacicano, R., Ríos Saucedo, J., 2012. Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* en Durango, México. Agrofaz.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Arreola-Ávilaz, J.G., Sánchez-Cohen, I., Valdez-Cepeda Y, R.D., García-Herrera, G., 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. Madera Bosques 15, 27–44. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1521189>
- Chávez gándara, M.P., Cerano paredes, J., Nájera Luna, J.A., Pereda Breceda, V., Esquivel Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón Sandoval, V.H., Corral Rivas, S., 2017. Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas , Durango , México Winter-spring precipitation reconstruction

- from tree-rings for San Dimas region, Durango , Mexico. *Bosque* 38, 387–399. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>
- Cleaveland, M.K., Stahle, D.W., Therrell, M.D., Villanueva-Díaz, J., Burns, B.T., 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Clim. Change* 59, 369–388. <https://doi.org/10.1023/A:1024835630188>
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.). 2006. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Dirección del Área Natural Protegida Cumbres de Monterrey, Nuevo León. 179 pp.
- Constante García, V., Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Cornejo Oviedo, Eladio H. Valencia Manzo, S., 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Rev. Cienc. For. en México* 3, 1–16.
- Constante-García, V., 2015. Aplicación de técnicas dendrocronológicas en *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Quercus canbyi* Trel. para analizar la influencia climática y el cambio de uso de suelo. Facultad de Ciencia Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linare, Nuevo León.
- Dawson, T.E., 1996. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift 16, 263–272.
- De la Paz-Pérez, C., Dávalor Sotelo, R., 2016. Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y Bosque* 22, 113–132.
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., 2016. Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera Bosques* 22, 111–123. <https://doi.org/10.1146/annurev.immunol.23.021704.115606>
- Dünisch, O., Bauch, J., 1994. Influence of Soil Substrate and Drought on Wood Formation of Spruce (*Picea abies* [L .] Karst .) under Controlled Conditions. *Holzforschung* 48, 447–457.

- Dutton, A., Wilkinson, B.H., Welker, J.M., Bowen, G.J., Lohmann, K.C., 2005. Spatial distribution and seasonal variation in 18 O / 16 O of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrol. Process.* 4146, 4121–4146. <https://doi.org/10.1002/hyp.5876>
- Eckenwalder, J. E. 2009. *Conifers of the world, the complete reference*. Timber Press. Portland-London. 720 pp.
- Estrada Castellón, A.E., Villareal Quintanilla, J.Á., Salinas Rodríguez, M.M., Cantú Ayala, C.M., González Rodríguez, H., 2014. *Coníferas de Nuevo León, México*, 1st ed. Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*, Academic P. ed. London - New York-San Francisco.
- Gemmell, A. R. 1969. *Developmental Plant Anatomy*. London, Edward Arnold.
- Gernandt, D.S., Perez-de la Rosa, J.A., 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México Biodiversity of Pinophyta (conifers) in Mexico. *Rev. Mex. Biodivers.* 85, 126–133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Giraldo Jiménez, J.A., 2011. Dendrocronología en el trópico: Aplicaciones actuales y potenciales. *Colomb. For.* 14, 97–111.
- González-Elizondo, M.S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J.A., Ruacho-González, L., López-Enríquez, L., 2012. Vegetación de la sierra madre occidental , México : una síntesis Instituto Politécnico Nacional , Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional , Unidad Durango , Sigma 119 , RESUMEN La Sierra Madre Occidental (SMO) es. *Acta Bot. Mex.* 403, 351–403.
- González Juan, Julián (2019) Respuesta del crecimiento de *Pinus pseudostrobus* Lindl a las variables climáticas en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Maestría thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18631>
- Grissino Mayer, H., 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.* 57, 205–221. <https://doi.org/S>

- Gutiérrez García, G., Ricker, M., 2019. Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Rev. Mex. Biodivers.* 90. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>.
- Gutiérrez, E., 2009. La dendrocronología: métodos y aplicaciones. *Arqueol. Naut. mediterrània* 6, 309–322.
- Gutierrez-Garcia, G., 2004. Análisis dendrocronológico y económico de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis*, y *Pinus teocote* en la Sierra de Peña Nevada, Nuevo León. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3077.4240>
- Husch, B., Miller, C. y Beers, T. 1993. *Forest Mensuration*. Krieger Publishing Company, Third Edition Malabar, Florida
- Huxman, T.E., Turnipseed, A.A., Sparks, J.P., Harley, P.C., Monson, R., 2003. Temperature as a control over ecosystem CO₂ fluxes in a high-elevation, subalpine forest. *Ecosyst. Ecol.* 537–546. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1131-1>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Cambio climático: Impactos, adaptación y vulnerabilidad–Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza, 34 p.
- Kerhoulas, L.P., Kolb, T.E., Koch, G.W., 2013. Tree size , stand density , and the source of water used across seasons by ponderosa pine in northern Arizona. *For. Ecol. Manage.* 289, 425–433. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.036>
- Kozlowski, T. T. 1979. *Tree Growth and Environmental Stress*. The Geo. S. Long publication series. University of Washington Press. Seattle, USA. 192 p
- Mendoza Villa, O.N., Cambrón Sandoval, V.H., Cerano Paredes, J., Cervantes Martínez, R., Soto Correa, J.C., 2018. Reconstruction of historical precipitation (1877-2014) for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro, Mexico. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. y del Ambient.* 24, 371–386. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.01.008>.

- Ortega Arroyo, E.J., Jiménez Pérez, J., Villanueva Díaz, J., Yamallel, I.Y., Alanís Rodríguez, E., 2018. Reconstrucción de algunas sequías a través de anillos de crecimiento para el norte de México. *Rev. Mex. Ciencias For.* 9, 439–462.
- Paredes, J.C., Díaz, J.V., David, R., Cepeda, V., Heriberto, E., Oviedo, C., Sánchez, I., Constante, V., 2009. Tree-Rings for Southwestern Coahuila.
- Rosas H., A., Günther, M.G., 2014. Cambio climático. Poder, discursos y prácticas. pp. 85–121.
- Rzendowski, J., 1978. Otros tipos de vegetación. *Veg. México* 365–379.
- Sáenz Ceja, J.E., Carlón Allende, T., Pérez Salicrups, D., 2014. La dendrocronología: ¿y si los árboles hablaran...? *Boletín la UNAM* 48, 9.
- Santillán-Hernández, M., Cornejo-Oviedo, E.H., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Capó-Arteaga, M.Á., 2010. Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera Bosques* 16, 17–30. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1611177>
- Schweingruber, F.H., 1988. Tree Rings Basics and Applications of Dendrochronology. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht. 276 pp.
- Stahle, D.W., Therrell, M.D., Cleaveland, M., 2004. Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México.
- Studhalter, R. A. 1956. Early history of crossdating. *Tree-Ring Bulletin* 21: 31-35.
- Tang, K., Feng, X., 2001. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants source water. *Earth Planet. Sci. Lett.* 185, 355–367.
- Teofrasto, 1988. Historia de las plantas. Editorial Gredos. Madrid. ISBN 978-84-249-1271-0.
- Therrell, M.D., Stahle, D.W., Cleaveland, M.K., Villanueva-díaz, J., 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico 107, 1–8.
- Vignote-Peña, S., Martínez, I., 2006. Tecnología de la madera libro, 3 ed. ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Villanueva Diaz J. y G.R. McPherson. 1996. Reconstruction of precipitation and PDSI from tree-ring chronologies developed in mountains of New Mexico,

- USA and Sonora, Mexico. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest. Hydrology Section. Arizona Nevada Academy of Science 26: 45-54.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D.W., Estrada Ávalos, J., Constante García, V., 2008. Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziensis* (Mirb.) Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México, Folleto científico 23.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Vázquez-Selem, L., Stahle, D.W., Ruiz Corral, J., Yocom, L.L., Ramos Franco, O.F., 2015. Red dendrocronológica del Pino de Altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. Investig. Geogr. 86, 5–14. <https://doi.org/10.14350/rig.42003>
- Villanueva Díaz, J., Fulé, P., Cerano Paredes, J., Estrada Ávalos, J., Sánchez Cohen, I., 1989. Reconstrucción de la precipitación estacional para el Barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.). Cienc. For. en México 34, 37–69.
- Villanueva Díaz, J., Stahle, D.W., Cerano Paredes, J., Luckman, B.H., Therrell, M.D., Cleaveland, M.K., Cornejo-Oviedo, E., 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. Clim. Change 15. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva-Díaz, J., González-Elizondo, M., Cerano-Paredes, J., Estrada, J., 2018. Red dendrocronológica de pino triste (*Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional. Madera y Bosques 24, 1–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421530>
- Wigley, T.M., Briffa, K.R., Jones, P.D., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. J. Clim. Appl. Meteorol. 23, 201–213.
- Wimmer R, Strumia G, Holawe F, 2000. Use of false- rings in Austrian pine to reconstruct early growing season precipitation. Can. J. For. Res, 30:1691-1697.